



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas

Doctorado en Ciencias en Recursos Naturales y
Medio Ambiente en Zonas Áridas

**ZONIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE ÁREAS DE PASTIZAL Y
PRÁCTICAS DE RECUPERACIÓN EN ÁREAS DEGRADADAS DE
ZONAS ÁRIDAS**

TESIS

Que como requisito parcial
para obtener el grado de:

**DOCTOR EN CIENCIAS EN
RECURSOS NATURALES Y MEDIO AMBIENTE
EN ZONAS ÁRIDAS**

Presenta:

LUIS GERARDO YAÑEZ CHÁVEZ

Bajo la supervisión de: AURELIO PEDROZA SANDOVAL, Dr.



DIRECCION GENERAL ACADEMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXAMENES PROFESIONALES

Bermejillo, Durango, México. Mayo, 2019.



inifap

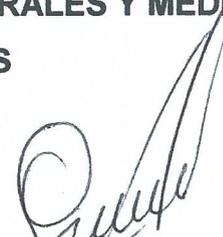
Instituto Nacional de Investigaciones
Forestales, agrícolas y Pecuarías

**ZONIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE ÁREAS DE PASTIZAL Y
PRÁCTICAS DE RECUPERACIÓN EN ÁREAS DEGRADADAS DE ZONAS
ÁRIDAS**

Tesis realizada por **LUIS GERARDO YÁÑEZ CHÁVEZ** bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

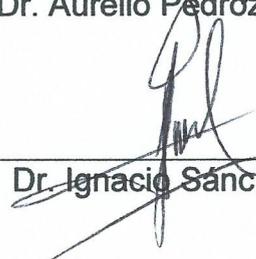
**DOCTOR EN CIENCIAS EN RECURSOS NATURALES Y MEDIO AMBIENTE
EN ZONAS ÁRIDAS**

DIRECTOR:



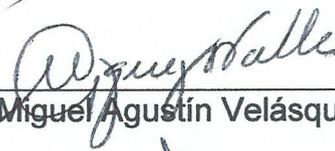
Dr. Aurelio Pedroza Sandoval

CO-DIRECTOR:



Dr. Ignacio Sánchez Cohen

ASESOR:



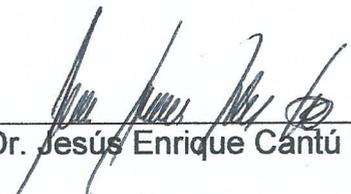
Dr. Miguel Agustín Velásquez Valle

ASESOR:



Dr. Armando López Santos

LECTOR EXTERNO:



Dr. Jesús Enrique Cantú Brito

CONTENIDO

TEMA	PÁGINA
ABREVIATURAS USADAS	ix
DEDICATORIAS	x
AGRADECIMIENTOS	xi
DATOS BIOGRÁFICOS	xii
RESUMEN GENERAL	xiii
ABSTRACT	xiv
CAPÍTULO I	1
1. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.1 Áreas de pastizal en zonas áridas	2
2. OBJETIVOS	4
2.1 Objetivo general	4
2.2 Objetivos específicos	4
3. HIPÓTESIS	4
4. REVISIÓN DE LITERATURA	5
4.1 La degradación del suelo: Contexto y problemática	5
4.2 Los procesos de degradación: evidencia de un progreso irracional.....	7
4.3 La desertificación y su incremento por los procesos naturales	9
4.4 El ecosistema del pastizal en el norte de México	9
4.5 Ganadería extensiva y su crecimiento mundial	12
4.6 El escenario de la ganadería extensiva y su impacto en los ecosistemas de pastizal	14
4.7 Ejes de controversia en la degradación de pastizales por efecto del ganado ...	16
4.8 Alternativas para neutralizar la degradación del suelo.....	17
4.8.1 Marco conceptual de la NDT.....	18
4.8.2 Reconversión productiva como estrategia de ordenamiento ecológico	20
4.9 Literatura citada	21
CAPÍTULO II	28
MICRO-REGIONALIZACIÓN CON BASE EN INDICADORES DE ARIDEZ, SEQUÍA Y FISIOGRAFÍA EN LA CUENCA MEDIA DE LOS RÍOS NAZAS-AGUANAVAL..	28
RESUMEN	28
ABSTRACT	29
INTRODUCCIÓN	30

MATERIALES Y MÉTODOS	31
Ubicación geográfica.....	31
Criterios de regionalización	32
Determinación de microrregiones fisiográficas	32
Determinación del índice de aridez	33
Determinación de la intensidad de la sequía anual	34
Dominancia de vegetación y tipo de suelo	35
Integración de criterios de regionalización.....	35
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	35
Caracterización	35
Tipo de suelos y vegetación dominante	36
Grado de aridez	37
Sequía anual.....	38
Microrregionalización	40
CONCLUSIONES	41
LITERATURA CITADA.....	42
CAPÍTULO III.....	47
ZONIFICACIÓN AGROCLIMÁTICA DE ÁREAS DE PASTIZAL COMO HERRAMIENTA DE APOYO EN LA RECONVERSIÓN PRODUCTIVA	47
RESUMEN	47
ABSTRACT.....	48
INTRODUCCIÓN	49
MATERIALES Y MÉTODOS	50
Ubicación geográfica del área de estudio.....	50
Selección y requerimientos bioclimáticos de los pastos	50
Criterio edafológico	52
Criterio climático.....	52
Criterio topográfico.....	52
Estimación y delimitación de zonas potenciales	53
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	53
Superficies potenciales para los pastos	53
Distribución espacial de los pastos nativos	54
Distribución espacial de los pastos introducidos.....	56
Porcentaje relativo de superficie óptima y subóptima	58

CONCLUSIONES	62
LITERATURA CITADA.....	63
CAPÍTULO IV	68
USO DE RETENEDORES DE HUMEDAD DEL SUELO EN LA SOBREVIVENCIA Y CRECIMIENTO DE <i>Bouteloua curtipendula</i> [Michx.] Torr. Y <i>Chloris gayana</i> Kunth EN ÁREAS DEGRADADAS DE PASTIZAL	68
RESUMEN	68
ABSTRACT	69
INTRODUCCIÓN	70
MATERIALES Y MÉTODOS	71
Diseño experimental	71
Medición de variables.....	72
Análisis estadístico.....	73
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	73
Velocidad de germinación	73
Contenido de humedad en el suelo.....	74
Sobrevivencia de plántula	77
Número de macollos; altura de planta e índice de clorofila.....	78
Contenido de materia seca aérea y radical de planta	80
CONCLUSIONES	82
AGRADECIMIENTOS	83
LITERATURA CITADA.....	83
CAPÍTULO V	87
SOBREVIVENCIA, CRECIMIENTO Y PRODUCCIÓN DE <i>Bouteloua gracilis</i> H.B.K Y <i>Pennisetum ciliare</i> L. EN ÁREAS DEGRADADAS DEL NORTE DE MÉXICO ...	87
RESUMEN	87
ABSTRACT	88
INTRODUCCIÓN	89
MATERIALES Y MÉTODOS	90
Evaluación preliminar de la degradación del pastizal en el área de estudio	91
Diseño experimental	92
Variables climáticas	93
Constantes de humedad en el suelo	93
Variables medidas.....	94

Análisis estadístico.....	95
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	95
Variables climáticas	95
Contenido de humedad en el suelo.....	97
Porcentaje de sobrevivencia de plántula	99
Crecimiento y desarrollo de la planta	100
Actividad fotosintética y eficiencia en el uso del agua	103
Cantidad de biomasa, rendimiento y calidad de forraje	105
CONCLUSIONES	106
LITERATURA CITADA.....	106

ÍNDICE DE CUADROS

CUADRO	PÁGINA
CAPÍTULO I	1
1. Sistemas de clasificación para determinar índices de aridez.....	5
CAPÍTULO II	28
2. Valores del índice de aridez y categorías planteadas por Stretta & Mosiño....	34
3. Clasificación para el porcentaje de sequía anual.....	35
4. Microrregiones con la integración de los indicadores índice de aridez, sequía, tipo de suelo y vegetación dominante.....	40
CAPÍTULO III	47
5. Requerimientos de altitud, precipitación, temperaturas y características edáficas óptimas para los pastos nativos e introducidos.....	51
6. Superficies potenciales en la cuenca media de los ocho pastos.....	54
7. Porcentajes relativos para potenciales altos y medios con respecto al total de la cuenca media Nazas-Aguanaval.....	59
8. Superficies potenciales de los pastos involucrando ocurrencia de precipitación a diferentes probabilidades.....	61
CAPÍTULO IV	68
9. Porcentaje de sobrevivencia por especie de pasto, diferentes dosis de hidrogel y cobertura vegetal a base de rastrojo de maíz.....	78
10. Características morfométricas en dos especies de pasto en diferentes dosis de hidrogel y cobertura vegetal a base de rastrojo de maíz.....	79
11. Producción de biomasa aérea en peso seco de dos especies de pastos en diferentes dosis de hidrogel y rastrojo de maíz.....	80
12. Producción de biomasa en peso seco de raíz de dos especies de pastos en diferentes dosis de hidrogel y rastrojo de maíz.....	81
CAPÍTULO V	87
13. Indicadores que califican a los atributos de un ecosistema.....	91
14. Porcentaje de humedad del suelo en diferentes fechas y cálculo de reservas de humedad de riego para tratamientos con hidrogel, cobertura vegetal con rastrojo de maíz y testigo.	98
15. Porcentaje de sobrevivencia por especie de pasto, método de siembra, diferentes dosis de hidrogel y cobertura vegetal con rastrojo de maíz en el año 2016 y 2017.....	100
16. Variables fisiológicas y eficiencia en el uso del agua en dos especies de pastos, dos métodos de siembra y retenedores de humedad del suelo en los años 2016 y 2017.....	104
17. Peso de biomasa área, radical, rendimiento y contenido proteico en dos especies de pastos y dos métodos de siembra en los años 2016 y 2017.....	105

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA	PÁGINA
CAPÍTULO I	1
1. Productividad primaria neta estimada en áreas con predominio de pastizal.....	12
2. Distribución estimada de los sistemas de producción pecuaria.....	13
CAPÍTULO II	28
3. Ubicación de estaciones climáticas en la cuenca media Nazas-Aguanaval....	33
4. Subcuencas que conforman la Cuenca media Nazas-Aguanaval.....	36
5. Representación espacial de los suelos dominantes (A) y la vegetación (B) en el área de estudio.....	37
6. Índice de aridez (A) e índice de sequía (B) del área de estudio.....	39
7. Microrregiones integradas en la Cuenca media Nazas-Aguanaval.....	40
CAPÍTULO III	47
8. Áreas con potencial productivo para <i>B. gracilis</i> (izquierda) y <i>B. curtipendula</i> (derecha) en la cuenca media Nazas-Aguanaval.....	55
9. Áreas con potencial productivo para <i>S. macrostachya</i> (izquierda) y <i>L. phleoides</i> (derecha) en la cuenca media Nazas-Aguanaval.....	56
10. Áreas con potencial productivo para <i>P. ciliare</i> (izquierda) y <i>C. gayana</i> (derecha) en la cuenca media Nazas-Aguanaval.....	57
11. Áreas con potencial productivo para <i>C. dactylon</i> (izquierda) y <i>C. plectostachyus</i> (derecha) en la cuenca media Nazas-Aguanaval.....	58
CAPÍTULO IV	68
12. Tasa de germinación (no. de semillas día ⁻¹) en pastos <i>B. curtipendula</i> [Michx.] Torr. y <i>C. gayana</i> Kunth.....	74
13. Abatimiento de humedad a 15 cm (A) y 30 cm (B) de profundidad del suelo en diferentes contenidos de hidrogel y diferentes fechas de muestreo	75
14. Abatimiento de humedad a 15 cm (A) y 30 cm (B) de profundidad del suelo con y sin cobertura de rastrojo de maíz en diferentes fechas de muestreo.....	76
CAPÍTULO V	87
15. Curva de abatimiento de humedad del suelo en Megapascales.....	94
16. Precipitación y temperatura media mensual registrada en el área de estudio durante el 2016 (A) y 2017 (B).....	96
17. Altura de plántula con método de siembra trasplante (A) y siembra directa (B), bajo diferentes retenedores de humedad del suelo.....	101
18. Altura de plántula para <i>B. gracilis</i> (A) y <i>P. ciliare</i> (B), bajo diferentes retenedores de humedad del suelo.....	102

ABREVIATURAS USADAS

ANOVA	Análisis de varianza
CC	Capacidad de campo
CONABIO	Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad
CONAFOR-UACH	Convenio de colaboración entre el Consejo Nacional Forestal y la Universidad Autónoma Chapingo
COTECOCA	Comisión Técnico Consultiva de Coeficientes de Agostadero
DOF	Diario Oficial de la Federación
ECOPAD	Estrategia para la conservación de los pastizales del desierto Chihuahuense
ERIC III	Extractor Rápido de Información Climatológica versión 3
FAO	Food and Agriculture Organization
IDW	Interpolación de la Distancia Inversa Ponderada
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
MANOVA	Análisis multivariante de la varianza
MDE	Modelo Digital de Elevaciones
MEA	Millennium Ecosystem Assessment
NDT	Neutralidad en la Degradación de las Tierras
PMP	Punto de marchitez permanente
PNUMA	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
RAW	Agua fácilmente extraíble (sin estrés hídrico) por la planta
RH36	Región Hidrológica 36
RMS	Raíz de la media cuadrática
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SIG	Sistema de información geográfica
UNCCD	Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación
UNEP	United Nations Environmental Programs
ZAE	Zonificación agro-ecológica

DEDICATORIAS

A Dios:

Por ser el forjador de mí camino y dirigirme por el sendero correcto.

A mi esposa Mayela:

Por ser mi fuerza, apoyo e inspiración para cada una de las cosas que hago, gracias por conceder parte del tiempo que pudo haber sido para ti.

A mis padres:

Por el soporte y afecto brindado durante toda mi vida.

A mis hermanos y hermanas:

A quienes agradezco el apoyo que siempre he tenido de su parte.

A Gladys Guadalupe:

Como en todos mis logros, en este has estado presente.

A Rafael:

Por ser un gran amigo, apoyarme en todo momento y seguir compartiendo nuestros logros en la vida.

A Margarita:

Por su apoyo incondicional y el cariño que siempre me ha mostrado.

AGRADECIMIENTOS

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)** por el financiamiento otorgado a través del Programa de Becas Nacionales, para el desarrollo y término de mis estudios de posgrado.

Al Programa de **Posgrado en Recursos Naturales y Medio Ambiente en Zonas Áridas**, de la Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas, dependiente de la Universidad Autónoma Chapingo, por brindarme la oportunidad de pertenecer a la primera generación de doctorado.

A mi director de tesis, **Dr. Aurelio Pedroza Sandoval** por la acertada dirección, aportes y enseñanzas que contribuyeron a mi formación integral y a la culminación de esta investigación.

Al Comité Asesor, **Dr. Ignacio Sánchez Cohen, Dr. Miguel Agustín Velásquez Valle** y **Dr. Armando López Santos**, por el tiempo dedicado y sus invaluable comentarios y aportaciones a este trabajo de investigación.

Al lector externo, **Dr. Jesús Enrique Cantú Brito** por su disposición y participación al revisar esta tesis doctoral.

Especial mención al **Dr. Francisco Guadalupe Echavarría Chairez, Dr. Martín Martínez Salvador** y **Dr. Oscar Pérez Veyna**, por su colaboración y valiosas observaciones en el desarrollo de este trabajo.

A los agricultores y ejidatarios de los municipios de Mapimí y San Luis del Cordero, Durango, por su aporte desinteresado y facilidades otorgadas para llevar a cabo la fase de campo de esta investigación.

A las personas y amigos que se involucraron en este trabajo, **M.C. Alondra Gisela Campos Villarreal, M.C. José Antonio Chávez Rivero, Tec. Joel Burgueño, Ing. Ruth Méndez, Ing. Victor Vargas** y a los estudiantes PROFONI, por su valioso apoyo en la recolección de datos de campo y laboratorio.

A mis compañeras y amigas de la generación 2015-2018, **M.C. Berenice Esquivel Valenzuela, M.C. Maly Nay Buendía Tamariz** y **M.C. Selenne Yuridia Márquez G.**, un honor haber compartido esta etapa de mi vida con ustedes.

DATOS BIOGRÁFICOS



Datos personales

Nombre: Luis Gerardo Yáñez Chávez

Fecha de nacimiento: 27 de agosto de 1988

Lugar de nacimiento: San Juan del Río, Durango, México

No. Cartilla militar: D-1319390

CURP: YA CL880827HDGXHS08

Profesión: Ingeniero Agrónomo

Desarrollo académico

Bachillerato: Técnico en Informática agropecuaria en el Centro de Bachillerato Tecnológico agropecuario no. 63 (2003-2006). Cédula profesional: 5471119.

Licenciatura: Ingeniero Agrónomo en Sistemas Agrícolas de Zonas Áridas por la Universidad Autónoma Chapingo, en la Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas (2006-2011). Cédula profesional: 7570270.

Maestría: Maestro en Ciencias en Recursos Naturales y Medio Ambiente en Zonas Áridas en el Posgrado en RNYMAZA de la URUZA-UACH (2012-2013). Cédula profesional: 10588729.

Desarrollo científico

Participación como autor o coautor en siete artículos científicos sobre bioproductividad en cultivos básicos, forrajeros y pastos, aplicación de retenedores de humedad del suelo, biofertilizantes y uso eficiente del agua.

Autor del capítulo de libro "Management practices and bioproductivity in grassland of dry areas" en *Grasses as Food and Feed* editado por IntechOpen. Coautor del capítulo de libro "Water harvesting and soil water retention practices for forage production in degraded areas in arid lands of Mexico" en *New Perspectives in Forage Crops* en la editorial IntechOpen.

Participación como ponente en congresos nacionales e internacionales, dentro de los que destacan el Congreso de la Sociedad Mexicana de Manejo de Pastizales, Semana Internacional de Agronomía de la FAZ-UJED, Congreso de Investigación CIESLAG y Congreso sobre Recursos Bióticos de Zonas Áridas.

La concentración de los trabajos de investigación antes citados, consolida un *RG score* de 5.98 a febrero del 2019, un indicador de la Social Networking Site de referencia científica o plataforma *ResearchGate*.

RESUMEN GENERAL

Zonificación y caracterización de áreas de pastizal y prácticas de recuperación en áreas degradadas de zonas áridas

La degradación del suelo impacta negativamente la bioproductividad en áreas de agostaderos en zonas áridas. La erosión de suelo, la pérdida de la vegetación y el sobrepastoreo, entre otros, son los principales factores que aceleran el proceso de degradación de las tierras en regiones ganaderas del norte de México. El objetivo de este estudio fue evaluar diferentes prácticas de manejo de retención de humedad del suelo y uso de diferentes variedades de pasto para la rehabilitación de áreas degradadas en la cuenca media de los ríos Nazas-Aguanaval en el Estado de Durango, México. Se usaron técnicas geoespaciales para la zonificación agroclimática y fisiográfica del área de estudio en donde fueron evaluados diferentes materiales sintéticos y orgánicos como retenedores de humedad en el suelo y su impacto en el crecimiento y desarrollo de diferentes especies de pasto nativas e introducidas como una estrategia de mitigar la degradación del suelo. Se identificaron 15 microrregiones fisiográficas diferentes en la región de estudio. La cobertura vegetal a base de rastrojo, el uso de variedades introducidas de pasto y la siembra mediante trasplante fueron las mejores prácticas para la rehabilitación de los suelos, con un mejor desarrollo, crecimiento y producción de biomasa de pasto. Con base a lo anterior, es posible la rehabilitación de suelos degradados en áreas de pastizal de zonas áridas.

Palabras clave: Micro-regionalización, potencial productivo, pastizales, bioproductividad, humedad del suelo.

ABSTRACT

Zoning and characterization of grasslands and recovery practices in degraded areas of arid lands

Soil degradation negatively impacts the bioproductivity in rangeland areas in arid lands. Soil erosion, loss of vegetation and overgrazing, among others, are the main factors that increase the process of land degradation in livestock regions of northern Mexico. The aim of this study was to evaluate different management practices of soil moisture retention and the use of different varieties of grass for the rehabilitation of degraded areas in the middle watershed of the Nazas-Aguanaval River in the State of Durango, Mexico. Geospatial techniques were used for the agroclimatic and physiographic zoning of the study area where different synthetic and organic materials as moisture retention in the soil and its impact on the growth and development of different native and introduced grass species were evaluated as a strategy to mitigate soil degradation. Fifteen different physiographic micro regions were identified in the study region. The plant cover based on maize stubble, the use of varieties of introduced grass and the sowing by means of transplant were the best practices for the rehabilitation of soils, with better development, growth and grass biomass production. Based on the above, it is possible to rehabilitate degraded soils in grasslands of arid lands.

Key words: Micro-regionalization, productive potential, grasslands, bioproductivity, soil moisture.

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

A nivel mundial, el interés por los procesos de desertificación y degradación de la Tierra ha sido plasmada desde la creación de la Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación (UNCCD, por sus siglas en inglés) (UNCCD, 2017a), sin embargo, la preocupación ha sido más antigua y solo recientemente destacada por el impacto del cambio climático.

La degradación de las tierras es extensiva, más del 75 % del área terrestre de la Tierra ya está degradada (Cherlet *et al.*, 2018), además afecta cerca de 3.2 billones de personas globalmente, lo que empuja al planeta a una sexta extinción masiva de especies y cuesta más del 10 % del producto bruto global anual de biodiversidad y servicios ecosistémicos (Scholes *et al.*, 2018). Este proceso es definido por la UNCCD como “La reducción o pérdida de la productividad biológica o económica y complejidad de las tierras de cultivo de secano o de cultivo de regadío, pastizales, bosques, resultantes del uso de la tierra o de un proceso o combinación de procesos derivados de actividades humanas”.

Específicamente, la degradación del suelo puede ser física, química y biológica; causada entre otros factores por el agua y/o viento, ocasionando al final el deterioro del mismo (Lal *et al.*, 2012). Los suelos degradados son menos capaces de mantener la producción de la vegetación. Por ello, los efectos adversos sobre la vegetación afectan la degradación de los ecosistemas. Esta pérdida de vegetación nativa amenaza directamente los procesos y servicios del ecosistema. La degradación del suelo puede ser causada por actividades humanas, factores naturales o una combinación de ambos (Gisladottir & Stocking, 2005).

Particularmente un estudio de CONAFOR-UACH (2013) para México, muestra que el 89.3 % de la superficie presenta algún tipo de degradación de tierras (177.642 millones de hectáreas) por causas naturales y antrópicas. El 24.3 %

(47.541 millones de hectáreas) presentan degradación ligera, mientras el 17.2 % con degradación moderada (33.672 millones de hectáreas), 38.4 % (75.259 millones de hectáreas) con degradación severa y el 9.4 % con degradación extrema (18.499 millones de hectáreas).

Cuando los efectos de la degradación del suelo se presentan en ecosistemas en condiciones de aridez se emplea el término de desertificación. En las regiones de las zonas áridas y semiáridas en México, el incremento de la superficie afectada por el proceso de desertificación dificulta las condiciones para que prosperen los sistemas de producción basados en ganadería extensiva (Velásquez *et al.*, 2012).

Este proceso se ha definido como “la degradación de las tierras de zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas, que resulta de factores de origen climático y de actividades humanas, como la deforestación, el sobrepastoreo, la expansión de áreas agrícolas hacia áreas frágiles y la sobreexplotación de vegetación para uso doméstico” (UNCOD, 1977; MEA, 2005). Las causas del anterior escenario van desde el aumento de ocurrencia de sequías (Menocal & Álvarez, 2001; Barrera, 1996), el aumento de demandas de servicios ambientales y económicos por la población y el mal manejo de las tierras de pastoreo, lo que ha desencadenado en lo que actualmente se denomina sobrepastoreo (ECOPAD, 2007).

1.1 Áreas de pastizal en zonas áridas

La degradación de los recursos naturales de los pastizales en las zonas áridas y semiáridas como una forma de desertificación, es el factor que más afecta a estos ecosistemas en los que se practica ganadería extensiva. En la parte norte de México, más del 73 % de la superficie dedicada al pastoreo presenta diversos grados de erosión y la condición de los pastizales es regular (SEMARNAT, 2011), el 20 % se encuentran en una condición de regular a buena y sólo el 5 % presentan una condición excelente.

El monitoreo de las pérdidas de suelo y productividad de los pastizales es necesario para la toma de decisiones de mejoramiento y recuperación del mismo.

La identificación a través de la zonificación agroecológica de sitios de baja aptitud productiva y aquellas especies que pueden progresar bajo estas condiciones, permite ubicar donde realizar la reconversión del suelo y lograr que el cambio en el uso de éste, promueva la recuperación paulatina de la cobertura vegetal, la captación de humedad y la reducción de la erosión hídrica y eólica. Estas herramientas son importantes para la planeación estratégica del desarrollo agropecuario de la región.

El primer capítulo de esta tesis de investigación doctoral, incluye un análisis del estado del conocimiento respecto a la degradación de la tierra y en particular del ecosistema de pastizal y las implicaciones relacionadas con el crecimiento de la ganadería extensiva, además de los impactos de este sistema de producción en el medio ambiente.

Posteriormente, se presenta una caracterización micro-regional del área de la cuenca media Nazas-Aguanaval ubicada en el centro norte de México, con base a criterios de aridez, sequía y fisiografía, para una mejor planeación en el uso de los recursos naturales agua, suelo, planta animal en función de sus características comunes y potencial agroecológico.

El tercer capítulo, aborda la determinación del potencial productivo de diferentes especies de pastos de importancia forrajera y productiva para el área de estudio, en el cual se empleó la metodología de zonificación agroclimática utilizando los sistemas de información geográfica.

En los siguientes dos capítulos, se evaluaron diferentes prácticas de retención de humedad edáfica en el establecimiento y desarrollo de pastos nativos e introducidos en áreas de reconversión productiva de municipios representativos de la cuenca: San Luis del Cordero, Dgo, para el primer experimento y Mapimí, Dgo. en el segundo.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Contribuir al desarrollo tecnológico para la rehabilitación de áreas de pastizales degradadas mediante zonificación agroecológica, determinación del potencial productivo y evaluación de prácticas de manejo de conservación de humedad del suelo para la reconversión productiva en la zona norte de México.

2.2 Objetivos específicos

- i) Micro-regionalizar y caracterizar el potencial productivo en la cuenca media Nazas-Aguanaval, con base a la condición de aridez, tipo de suelo y fisiografía, mediante uso de sistemas de información geográfica y climática.
- ii) Identificar y representar cartográficamente las áreas con aptitud ecológica para el desarrollo de especies de pastos nativos e introducidos con mayor capacidad forrajera para una mayor y mejor bioproductividad.
- iii) Evaluar diferentes prácticas de retención de humedad en el suelo para el establecimiento y desarrollo pastos en áreas de reconversión productiva del municipio de San Luis del Cordero, Dgo. y recuperación de áreas degradadas en el municipio de Mapimí, Dgo.

3. HIPÓTESIS

H₀. Mediante uso de herramientas de micro-regionalización, caracterización, la evaluación integral de prácticas de manejo y conservación del suelo y agua, permite generar conocimiento tecnológico para el desarrollo regional en áreas degradadas de pastizal en zonas áridas.

4. REVISIÓN DE LITERATURA

4.1 La degradación del suelo: Contexto y problemática

A nivel mundial, el interés por los procesos de desertificación ha sido plasmada desde la creación de la Convención de las Naciones Unidas para combatir la desertificación (UNCCD, 2012), resultado de las inquietudes de la reunión de Río en 1992. Sin embargo, la preocupación ha sido más antigua (Declaración de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Humano, Estocolmo, junio de 1972; Los Límites del Crecimiento, Informe del Club de Roma, marzo, 1972) y solo recientemente matizada por el posible impacto del cambio climático.

Las regiones semiáridas del mundo alcanzan a cubrir el 45 % del planeta, donde el Índice de Aridez (precipitación anual/evapotranspiración potencial) oscila entre 0.05 y 0.65 (UNCCD, 2012); aunque hay otros sistemas de clasificación de acuerdo a distintos índices (Cuadro 1). Lo que es especialmente notable es que estas regiones también albergan el 33.8 % de la población, de este porcentaje el 29.7 % viven en pastizales y agostaderos de las zonas semiáridas y sub-húmedas secas (UNCCD, 2012). En términos del tema más actual sobre el cambio climático es relevante anotar que estas zonas “secas” (drylands) sus suelos contienen el 46 % del carbono del inventario planetario (UNCCD, 2012).

Cuadro 1. Sistemas de clasificación para determinar índices de aridez. Fuente: González, (2012).

Índice de aridez de la UNEP		Índice de Aridez de Embeger		Índice de aridez de Martonne	
Clase de aridez	$\frac{P_{ma}}{Evt}$ ^z	Clase de aridez	$\frac{(100 * P)}{Mi^2 - mi^2}$ ^y	Clase de aridez	$\frac{P}{T+10}$ ^x
Hiperárida	< 0.05	Árido	30 - 0	Árido extremo	0 - 5
Árida	0.05 – 0.20	Semiárido	50 - 30	Árido	5 - 15
Semiárida	0.20 – 0.50	Sub-húmedo	90 - 50	Semiárido	15 - 20
Subhúmeda seca	0.50 – 0.65	Húmedo	> 90	Sub-húmedo	20 - 30
Subhúmedas húmedas	0.65 – 1.00			Húmedo	30 - 60

^x =Precipitaciones anuales; T =Temperatura media anual.

^y P = Precipitación anual; Mi =Temperatura del mes más cálido; mi =Temperatura del mes más frío.

^z $PPma$ =Precipitación media anual; Evt =Evapotranspiración media anual.

La desertificación ocurre a partir de la degradación de los ecosistemas naturales en las tierras áridas y constituye un importante problema global (UNEP, 1992). La UNCCD lo define como “Degradación de la tierra por su uso en regiones áridas, semiáridas y secas húmedas que se origina a partir de varios factores que incluyen la variación climática y las actividades humanas”.

La degradación de las tierras es un fenómeno complejo, que suele implicar la pérdida de algunos o todos los factores siguientes: productividad, suelo, cobertura vegetal, biomasa, biodiversidad, servicios ecosistémicos y resiliencia ambiental. Es comúnmente causada por la sobreexplotación de los recursos de la tierra, tales como la eliminación de la vegetación, el agotamiento de nutrientes, el sobrepastoreo, el riego inadecuado, el uso excesivo de agroquímicos, la expansión urbana, la contaminación, u otros impactos directos (UNCCD, 2017b).

Por lo general, las consecuencias principales de la degradación de las tierras son: degradación química del suelo, pérdida de la cubierta vegetativa, pérdida de la capacidad de infiltración de la capa superficial, reducción del contenido de agua en el suelo, pérdida de materia orgánica, fertilidad y estructura, pérdida de la elasticidad del suelo, pérdida de la regeneración natural y disminución de la capa freática. La degradación afecta alrededor de un quinto de las zonas áridas, mayormente en los márgenes semiáridos de zonas de cultivo (FAO, 2007).

La UNCCD calcula que entre 71 y 75 % de las zonas secas del mundo están degradadas y desertificadas. De la superficie afectada por degradación en las tierras secas, cerca de 94 % se encontraba en los niveles de ligera y moderada, lo que sugiere que de seguir actuando los elementos que causan la degradación de estos suelos, podrían pasar a los niveles fuerte o extremo en el futuro, en los cuales la recuperación de su productividad sería materialmente imposible (UNCCD, 2012).

Respecto a la distribución de los procesos de degradación del suelo por región, la erosión eólica es el proceso dominante en las zonas áridas y semiáridas (FAO, 2007).

4.2 Los procesos de degradación: evidencia de un progreso irracional

La degradación de la tierra está presente en más de la tercera parte del planeta y se estima que sea cercana al 90 % para el año 2050 (Cherlet *et al.*, 2018); además afecta cerca de 3.2 billones de personas globalmente (Scholes *et al.*, 2018). Este proceso es definido por Conacher (2009) como la reducción a largo plazo de la función y servicios del ecosistema causada por alteraciones de las que no se puede recuperar por sí misma. Es preciso decir que ocurre en todo tipo de regiones climáticas, el término tierra incluye suelo, vegetación y agua; el concepto degradación implica, por tanto, consecuencias adversas para la humanidad y los ecosistemas.

Específicamente Lal *et al.* (2012), indican que los tipos de degradación del suelo incluyen la erosión causada por el viento o agua, además el deterioro de las propiedades físicas, químicas y biológicas del mismo. Lo cual, los suelos degradados son menos capaces de mantener la producción de la vegetación. Diversos autores señalan que la degradación del suelo puede ser causada por actividades humanas, factores naturales o una combinación de ambos (Gisladdottir & Stocking, 2005; UNCCD, 2012; Holtz, 2003).

Complementariamente Velásquez *et al.* (2012) señalaron que, cuando los efectos de la degradación del suelo se presentan en ecosistemas bajo condiciones de aridez, se emplea el término de desertización. En las regiones de zonas áridas y semiáridas, el incremento de la superficie afectada por el proceso de desertificación dificulta las condiciones para que prosperen los sistemas de producción basados en la ganadería extensiva. Este proceso se ha definido como “la degradación de las tierras de zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas, que resulta de factores de origen climático y de actividades humanas, como la deforestación, el sobrepastoreo, la expansión de áreas agrícolas hacia áreas frágiles y la sobreexplotación de vegetación para uso doméstico”(UNCOD, 1977; MEA, 2005).

Existen, de acuerdo a Granados *et al.* (2013), siete procesos responsables de la desertificación: i) degradación de la cubierta vegetal, ii) erosión hídrica, iii) erosión eólica, iv) salinización, v) reducción de la materia orgánica del suelo, vi) encostramiento y compactación del suelo y; vii) acumulación de sustancias tóxicas para los seres vivos. De éstos, los cuatro primeros se consideran procesos primarios de desertificación, debido a que sus efectos son amplios y tienen un impacto muy significativo sobre la producción de la tierra, y los tres últimos se consideran secundarios. La desertificación se evalúa con base en tres criterios: estado actual, velocidad y riesgo, considerando cuatro clases de desertificación: ligera, moderada, severa y muy severa. De este modo, las regiones áridas en su totalidad son susceptibles a la desertificación.

En las regiones áridas, la desertificación se ha atribuido tanto a factores relacionados con las acciones humanas (Ibáñez *et al.*, 1997; Colomer & Sánchez, 2000) como a eventos climáticos Granados *et al.* (2013). En la desertificación se halla todo un conjunto de procesos interrelacionados; físicos, biológicos, históricos, económicos, culturales y políticos, cuya manifestación plantea una diversidad de niveles de resolución, tanto en escala espacial como temporal. A pesar de esto, la identificación clara de las causas de la desertificación puede ser severamente obstaculizada por la interacción de los eventos antropogénicos y naturales (Ibáñez *et al.*, 1997), pero también por la confusión de los cambios cíclicos de corto plazo en el medio ambiente con aquellos que representan la degradación a largo plazo (UNCOD, 1977).

Por su parte, Stavi & Lal (2015), señalaron que más de 100 países presentan riesgos de desertificación, de los cuales sólo 18 industrializados o productores de petróleo disponen de recursos financieros para hacer frente a los problemas. Se estima que alrededor de 150 millones de personas están en riesgo de ser desplazadas a consecuencia de la desertificación. Sin embargo, Chapela (2003), enfatiza que la degradación de tierras es significativa tanto en su cantidad como en sus consecuencias, aunque al aparecer tiene una solución práctica, cuando no se ha alcanzado un estado avanzado de desertificación.

4.3 La desertificación y su incremento por los procesos naturales

La desertificación es causada por usos y prácticas de ordenación de la tierra insostenibles y por fenómenos climáticos extremos resultantes de diferentes factores sociales, económicos y de gobernanza. Hay procesos que incrementan la degradación de las tierras, de los cuales destacan la erosión, la salinización, la compactación, la acidificación y la contaminación de los suelos por productos químicos, entre otros (FAO, 2015).

Las causas fundamentales de la desertificación son de carácter natural y antropogénico. La sequía es el factor natural que más actúa como detonador o acelerador de la desertificación. De los factores antropogénicos relevantes que pueden derivar en un proceso de desertificación existe una gran variedad que depende de las diferentes sociedades y culturas; entre ellos cabe citar: la agricultura de riego y temporal; la ganadería y el pastoreo; la actividad forestal; el desarrollo urbano e industrial y los cambios de usos del suelo (Oropeza, 2007).

La desertificación es un concepto más amplio que el de desierto y el de zonas secas. Las áreas afectadas por los procesos de desertificación no han ocurrido cambios climáticos significativos y sin embargo se ha constatado un aumento considerable en la intensidad de las prácticas de manejo no sustentable de los recursos naturales, en especial de aquellas relacionadas con la producción agropecuaria (Morales, 2005).

Por ende, la desertificación es la consecuencia terminal de una serie de factores, tanto biofísicos como políticos, sociales, culturales y económicos. Todas las definiciones consideradas tienen como denominador común la percepción de que se trata de un problema de carácter mundial, causado principalmente por la acción degradadora del hombre sobre el medio ambiente (Morales, 2005).

4.4 El ecosistema del pastizal en el norte de México

Los pastizales son ecosistemas caracterizados por presentar una vegetación abierta dominada por especies herbáceas y cuya producción primaria es

aprovechada directamente por los herbívoros (Miller, 1990). Además, suelen estar situados en zonas con productividad relativamente baja que no son adecuadas para usos agrícolas intensivos, por su precipitación baja, tasa de evapotranspiración alta, suelos someros y con pedregosidad superficial (Cantú, 2011).

Los pastizales en el norte de México son ecológica y económicamente importantes. Ocupan más de 19 millones de hectáreas del territorio nacional, lo que representa el 36.6 % del total de superficie dedicado a sistemas productivos, la cual incluye la agricultura, los pastizales inducidos y cultivados (SEMARNAT, 2018). Estos pastizales son de gran valor debido a sus recursos ganaderos, faunísticos e hidrológicos, así como a su diversidad biológica. Son fundamentales como fuente de alimento para animales domésticos (Rebollo & Sal, 2003).

Los pastizales igualmente, mejoran y conservan los suelos, a los que se adicionan materia orgánica (20 t/raíces/ha). Son plantas que coadyuvan a la infiltración vertical del agua, lo que incrementa su cosecha: son reconstituyentes del suelo y mejoran su estructura; además, capturan y retienen carbono, disminuyendo la presencia en la atmósfera de gases de efecto invernadero, responsables del cambio climático global (Cantú *et al.*, 2010).

Sin embargo, en el ámbito extensivo, el ganado participa con frecuencia en la degradación de grandes áreas de pastizales en el norte de México; es un factor contribuyente a la deforestación mediante el desmonte para obtener pastos (Steinfeld *et al.*, 2009; Wharton, 2008). Los hatos de ganado provocan al mismo tiempo daños en el suelo a gran escala, principalmente a causa del sobrepastoreo, la compactación y la erosión (Bilotta *et al.*, 2007; Batey, 2009; Greenwood & Mc Kenzie, 2001).

En la actualidad, se reinició el interés por el uso eficiente y la conservación de los pastizales, debido a su importancia en la alimentación animal, al mantenimiento integral del ambiente y por ser uno de los ecosistemas más amenazados,

principalmente debido a la ganadería extensiva, la sequía y la conversión para tierras de cultivo (Asner *et al.*, 2004; Granados *et al.*, 2013).

La eficiencia en el uso del pastizal implica el aprovechamiento sostenible de este ecosistema para la alimentación del ganado doméstico, sin descuidar la fauna natural y la interacción con los ecosistemas contiguos. El pastizal es considerado como una de las fuentes más importantes en la alimentación de bajo costo para el ganado bovino, ovino y caprino (Steinfeld *et al.*, 2009; Estell *et al.*, 2012).

La utilización adecuada del pastizal proporciona beneficios económicos a los estados, áreas ganaderas, productores y consumidores finales de productos agropecuarios. A pesar de la importancia del pastizal, en los últimos años se ha descuidado su conservación, se fomentó la excesiva carga animal y como resultado se favoreció la reducción en la capacidad productiva del ecosistema, se observó erosión del suelo y pérdida de la biodiversidad (ECOPAD, 2007).

De acuerdo a las Cartas de Uso del Suelo y Vegetación, cuyas Series fueron elaboradas por el INEGI, para la década de los setenta (Serie I) se conservaba poco más del 75% de la superficie original de pastizales. Cuarenta años después, en 2014 (Serie VI), se conservaba casi el 60%; esto representa una pérdida neta de más de cerca de 6.7 millones de hectáreas de pastizales (SEMARNAT, 2018).

Los pastizales han sufrido un proceso de deterioro por causa de las actividades humanas. El sobrepastoreo, las sequías prolongadas y los incendios son solo algunos de los factores que los afectan. Al respecto, de acuerdo a la SEMARNAT, demostró que el sobrepastoreo afectaba al 95% de los pastizales naturales del norte árido de la república para el 2002 (SEMARNAT, 2003).

Además, para el 2008, se estimó que en los últimos 50 años se ha perdido el 70 % de la capacidad productiva de forraje del desierto chihuahuense y que en los últimos 20 años se ha reducido en un 50 % la producción ganadera (ECOPAD, 2007). Con ello, disminuyeron su eficiencia productiva y se redujeron los

beneficios sociales y económicos que se generan a partir de la producción agropecuaria en pastizales naturales.

4.5 Ganadería extensiva y su crecimiento mundial

La ganadería extensiva es referida aquel sistema de crianza de ganado que se lleva a cabo en grandes extensiones de terreno. La supervisión de los animales se hace de manera esporádica, además el ganado pastorea libremente y ellos mismos se encargan de buscar y seleccionar su alimentación en potreros.

El crecimiento de la ganadería extensiva es un común denominador a nivel mundial, cifras de Steinfeld *et al.* (2009) señalan que el ganado es el mayor usuario mundial de los recursos de las tierras: agostaderos empleados en el pastoreo y en la producción de forrajes representan el 78 % de todas las áreas agrícolas. Este porcentaje es alto, ya que engloba también a los forrajes sembrados en condición intensiva. La amplia distribución espacial en el mundo de los sistemas de producción pecuaria y las áreas de pastizal se muestra en las Figuras 1 y 2.

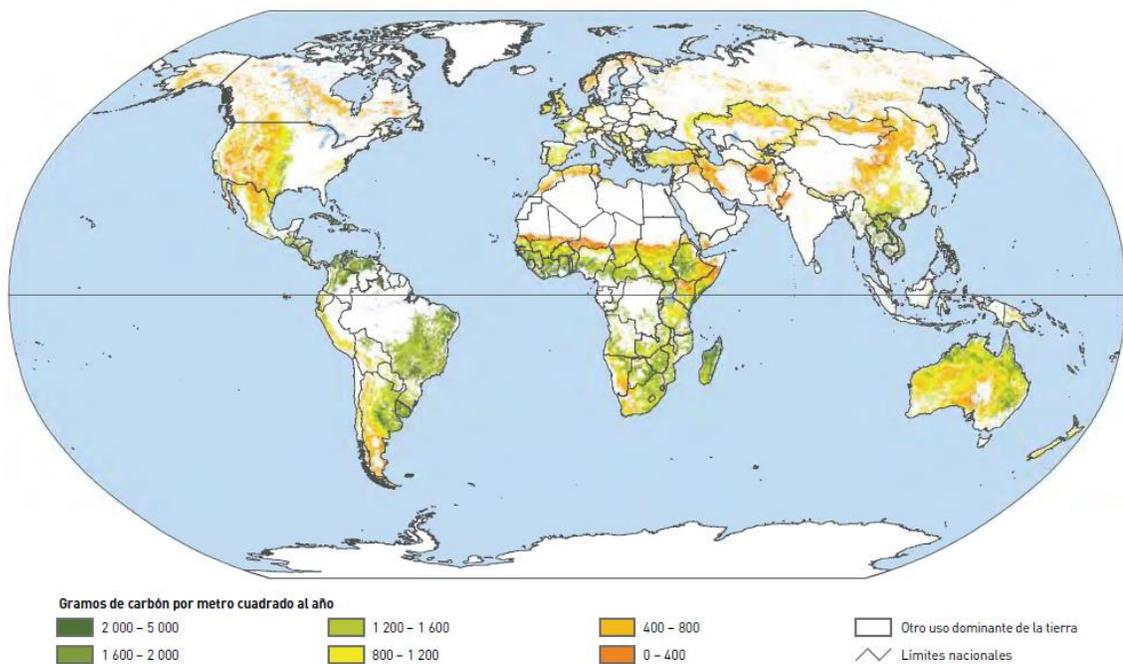


Figura 1. Productividad primaria neta estimada en áreas con predominio de pastizal. Fuente: Steinfeld *et al.* (2009).

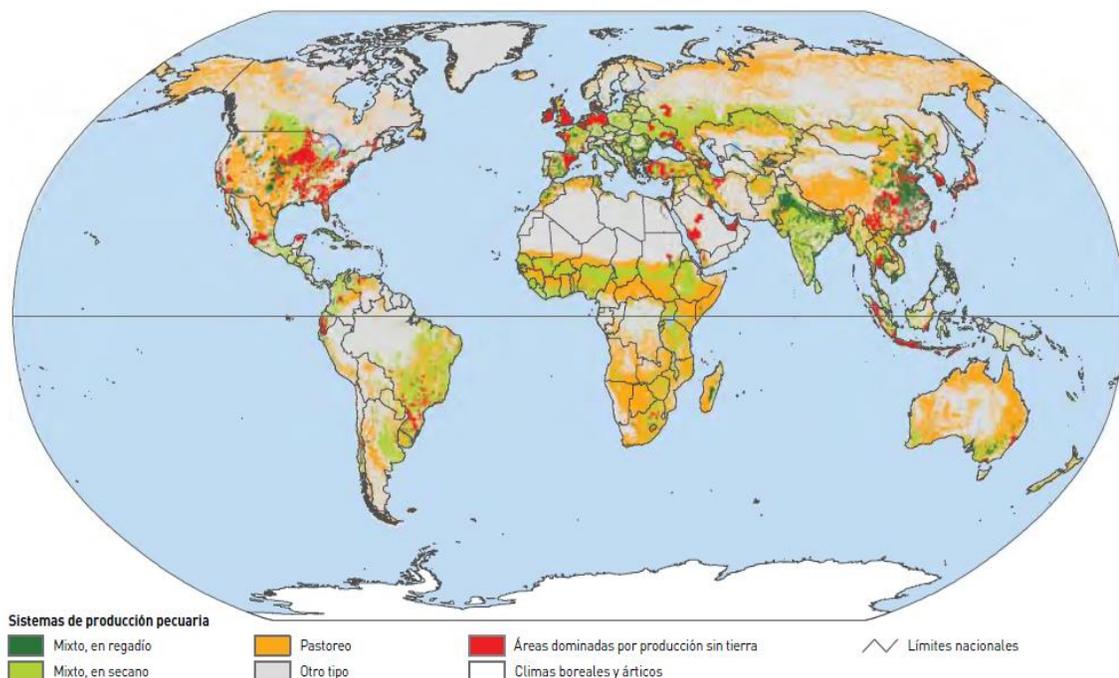


Figura 2. Distribución estimada de los sistemas de producción pecuaria. Fuente: Steinfeld *et al.* (2009).

Particularmente, hay similitud por diversos autores en cuanto al porcentaje de superficie destinada a la producción de pastizales, al respecto Calle *et al.* (2012) señalan que el sector agropecuario, con su actividad de pastoreo, ocupa alrededor del 30 por ciento de la superficie terrestre. Otro autores como Segrelles (2001), indica que el área total dedicada al pastoreo equivale al 26 por ciento de la superficie mundial. Además, otros estudios como el realizado por Steinfeld *et al.* (2009), revela que el sector emplea 2,000 millones de hectáreas para pastizales extensivos y 1,400 millones para pastos en condición intensiva.

Igualmente, la FAO (2009) señala que el sector ganadero a nivel mundial es muy amplio. Representa el 40 % de la producción agraria total y es la base de subsistencia de más de mil millones de personas. El sector pecuario es el mayor usuario y administrador de este tipo recursos en el mundo. Dicho sector ejerce una presión sobre el medio desproporcionada en relación con su importancia económica a escala mundial. Tanto es así, que genera menos del 2 % anual del PIB mundial, mientras que produce el 18 % de los gases de efecto invernadero (FAO, 2009). Sin embargo, su importancia aumenta extraordinariamente si se

tienen en cuenta otros criterios, como por ejemplo su papel capital en la seguridad alimentaria de todos los seres humanos del mundo.

4.6 El escenario de la ganadería extensiva y su impacto en los ecosistemas de pastizal

Bajo una óptica ambiental, el modelo ganadero extensivo contribuye a la degradación del territorio, pero en una proporción bastante inferior a la contribución del sistema productivo intensivo e industrial. Cabe destacar que, en la explotación extensiva, el aspecto que más repercusión ambiental tiene es el desmonte para la obtención de pastos. Por otro lado, también puede influir en la degradación de las áreas de pastizales como consecuencia de la sobreexplotación (Steinfeld *et al.*, 2009), sobre todo en las regiones áridas o semiáridas donde cultivos y plantas tardan más en desarrollarse.

Ahora bien, debido a su distribución de manera extensiva, se podría decir que su impacto negativo en cuanto a la emisión de flujos contaminantes o en la compactación del suelo, es menor que el modelo de producción intensivo. Esto se debe a que al encontrarse repartido en la superficie se supera la capacidad de carga del suelo. Es más, en la mayoría de los casos, autores como Steinfeld *et al.* (2009) y Greenwood & Kenzie (2001) indican que más que contaminar supone una carga de nutrientes y una contribución al desarrollo de esa superficie.

Por lo tanto, en el lado opuesto, es preciso resaltar también los aspectos positivos que tiene este tipo de explotación en el medio. Según se ha indicado, forma un estrecho vínculo con el medio. En esta línea, cabe destacar que aporta de manera sostenible abono natural (Contreras *et al.*, 2013), control de vegetación arbustiva (Barrera, 1996) y de la biomasa combustible en zonas forestales (Menocal & Álvarez, 2001), además de contribuir a la preservación de la biodiversidad (FAO, 2009).

Al parecer, la interacción del ganado con los ecosistemas es compleja y depende de la ubicación y de las prácticas de manejo. Los sistemas de producción

pecuaria extensiva se basan de acuerdo a ECOPAD (2007), en los recursos naturales, en el sentido de que hacen uso de los recursos disponibles localmente con usos alternativos limitados o, expresado en términos económicos, costos de oportunidad reducidos.

Algunos ejemplos de tales recursos son señalados por Contreras *et al.* (2013), al mencionar que son los residuos de los cultivos y las tierras objeto de pastoreo extensivo no aptas para el cultivo ni para otros usos. Al mismo tiempo, en los sistemas agropecuarios el ganado manejado de manera tradicional suele generar valiosos insumos como el estiércol para la producción agrícola, lo que garantiza la estrecha integración de los dos tipos de producción.

En particular, genéticamente condicionados, los pastos evolucionaron al pisoteo y defoliación (pastoreo) y, cuando no tienen suficiente vigor entran en latencia, evitando las épocas críticas, ya sea sequías o el invierno, para rebrotar vigorosamente cuando regresan la temperatura y humedad de crecimiento del suelo adecuadas para el crecimiento y desarrollo; por otra parte, su hábito de crecimiento modular hace que mantengan la estructura adecuada para cosechar lluvias, cubrir áreas de suelo desnudo y, a la vez, formar suelo (Contreras *et al.*, 2013).

Steinfeld *et al.* (2009) puntualiza que los mejores suelos en el mundo árido y semiárido, actualmente bajo uso agrícola, se formaron por pastos y aún es posible observar regiones con suelos agrícolas de profundidades de 1 m a 2 m que fueron pastizales en su historia más reciente.

Es preciso delimitar, que en un pastizal sano, una densidad de 60 mil macollos maduros por hectárea es normal (COTECOCA, 1979); debido al sobrepastoreo frecuente, la gran mayoría de los pastizales del árido y semiárido poseen una población menor a 2,000 macollos maduros por hectárea de especies perennes deseables (Asner *et al.*, 2004), es decir, las que resisten sequías, sobrepastoreos y bajas temperaturas, lo que deja amplias zonas de suelo desnudo y energía

solar que se disipa como calor, en lugar de generar riqueza a través de la fotosíntesis y pastoreo.

Principalmente, debido a que la cosecha de forraje y otros productos del pastizal es interpretada por el propietario del área de pastoreo, como “cosecha de oportunidad”: el primero en llegar o el que tenga más herramientas adecuadas de recolección, aprovecha el recurso antes que lo hagan otros; lo anterior, sin promover su abundancia y sin respetar reglas de aprovechamiento o sin conocer el efecto de su actividad a largo plazo.

4.7 Ejes de controversia en la degradación de pastizales por efecto del ganado

Las características que se hacen más recurrentes en los pastizales de las zonas áridas y semiáridas son el registro de sequías cíclicas (Echavarría *et al.*, 2009a) y la presión del uso del suelo con fines ganaderos (Wassenaar *et al.*, 2007) con un sistema de explotación extensivo. Lo anterior, conlleva a observar en estas regiones un denominador común: el sobrepastoreo. Al respecto, Velásquez *et al.* (2012), señalan que la degradación de los recursos naturales de los pastizales en zonas áridas y semiáridas como una forma de desertificación, es el factor que más afecta al ecosistema de pastizal, en el que se practica ganadería extensiva.

En las zonas áridas y semiáridas, donde se encuentran la mayoría del ecosistema de pastizal del mundo, la intensificación en el uso de los pastos (carga animal alta) no suele ser técnicamente viable ni rentable. Como resultado de la falta de conocimiento en el manejo y del aumento de la presión sobre las tierras, muchos de ellos se han convertido en zonas de libre pastoreo. En éstos y otros sistemas basados en los pastizales, Steinfeld *et al.* (2009) puntualiza que los incentivos y las tecnologías para mejorar la gestión de los pastos son escasos; por ello, se pierden la mejora de la productividad y los servicios ecosistémicos potenciales.

La deforestación provocada por el pastoreo excesivo es una característica común (Wassenaar *et al.*, 2007). En un estudio de PNUMA (2004), indicó que

aproximadamente un 20 % de los pastos y los pastizales del mundo han sufrido algún grado de degradación, y esta cifra asciende hasta el 73 % en las zonas áridas. Según los cálculos de la MEA (2005), entre un 10 % y un 20 % de los pastizales están degradados, debido sobre todo al pastoreo excesivo.

La degradación de las tierras del pastizal suele ser consecuencia de la falta de correspondencia entre la densidad de ganado y la capacidad del pastizal de recuperarse del pastoreo y del pisoteo. De forma ideal la proporción tierra-ganado debería ajustarse de manera continuada a las condiciones del pasto, en especial en climas secos (Cantú, 2011).

No obstante, por la falta de conocimiento y uso de prácticas de manejo, al aumento de la presión sobre los recursos y al número de obstáculos que dificultan el movimiento del ganado tales ajustes no suelen ser posibles. Esto ocurre en particular de acuerdo Steinfeld *et al.* (2009) en el caso de las zonas de pastoreo comunal áridas y semiáridas.

La degradación de los pastizales puede invertirse hasta cierto punto, si bien la velocidad del proceso y las mejores técnicas a tal fin siguen siendo temas objeto de debate. Las tierras de pastoreo pueden manejarse de manera sostenible en virtud de sistemas de propiedad común. No obstante, en los casos en que se han dividido estos sistemas de propiedad, se suele observar el pastoreo excesivo.

El argumento económico por el cual cada ganadero intenta ampliar al máximo sus beneficios personales, ello cuando los sistemas de propiedad común se dividen es claro: incrementar al máximo el número de animales por hectárea permite el cultivo de más recursos para beneficio individual. Esto fomenta la sobreexplotación de los recursos de tierras en detrimento de la productividad.

4.8 Alternativas para neutralizar la degradación del suelo

Para alcanzar la neutralidad en la degradación del suelo se requiere de un cambio de paradigma en la administración de la tierra. Algunas opciones son adoptar políticas y prácticas para minimizar la degradación actual y evitar la futura,

además de rehabilitar las tierras de producción degradadas y abandonadas, así como restaurar los ecosistemas naturales y seminaturales degradados que aporten beneficios vitales.

4.8.1 Marco conceptual de la NDT

El concepto de neutralidad en la degradación de la tierra (NDT) se introdujo por primera vez como “degradación neta cero de las tierras”, en una propuesta presentada en Río+20. Esta meta u objetivo se alcanzaría de la siguiente manera: gestionando la tierra de manera más sostenible, lo que reduciría la tasa de degradación; e incrementando la tasa de restauración de tierra degradada, de manera que se redujera a cero la degradación neta de la tierra (Grainger, 2015).

La característica más distintiva de la NDT como estrategia para tratar la degradación de la tierra, es la integración de las tres actividades descritas por la UNCCD (Artículo 1[b] del texto de la Convención): la “prevención y/o reducción de la degradación de la tierra”, la “rehabilitación de tierras parcialmente degradadas” y la “recuperación de tierras desertificadas” (Emanuelli-Avilés *et al.*, 2016).

La mayoría del conocimiento científico necesario para alcanzar la meta de la NDT existe; sin embargo, todavía persisten otros desafíos, como son: incrementar la cantidad de herramientas relevantes y tecnologías a escala local; superar restricciones sociales y reformar las iniciativas económicas; crear instituciones que perduren y sistemas de gobernanza justos; y mejorar los métodos y los indicadores para el monitoreo, la evaluación y la comunicación (UNCCD, 2014).

El marco de referencia científico de la NDT, fue planteado por Orr *et al.* (2017); el cual destacan que el objetivo primordial es referido al vínculo entre la prosperidad humana, la seguridad alimentaria y un ecosistema saludable.

Orr *et al.* (2017), destacan igualmente, una balanza central que soporta la base de la NDT, esta ilustra el mecanismo para la consecución de la neutralidad: asegurar que la futura degradación de las tierras (pérdidas) se contrarresta con

acciones positivas planificadas en otros lugares (ganancias) en el mismo tipo de terreno. El punto de apoyo de la balanza representa la jerarquía de las respuestas: evitar la degradación es la principal prioridad, seguida de la reducción de la degradación y, por último, revertir la degradación pasada.

Los autores además hacen referencia a una flecha en la parte inferior de la balanza, la cual muestra que la neutralidad necesita mantenerse a lo largo del tiempo, gracias a la planificación del uso de las tierras, que anticipa pérdidas y planifica ganancias. La gestión adaptativa aporta un aprendizaje que proviene de la supervisión para informar sobre ajustes a mitad de curso que ayuden a asegurar que se alcanza la neutralidad y se mantiene en el futuro.

Más recientemente Cowie *et al.* (2018), acuñaron los principios que sustentan la implementación de la NDT, los cuales se enfocan en los procesos de soporte necesarios para entregarla, incluidos los aspectos biofísicos y socioeconómicos, y sus interacciones.

En síntesis, estos autores puntualizan que los principios son sucesivos, progresivos y están englobados en etapas perfectamente delimitadas, los primeros destacan que la neutralidad no implica una pérdida neta del capital natural y es posible aprovechar el impulso de otros procesos relacionados con las actividades del establecimiento de metas para la neutralidad de la degradación de las tierras.

Posteriormente, se implantan bases de referencia de la NDT, a través de estimación y cálculo de indicadores; después se pretende evaluar las tendencias de degradación de las tierras, afín de comprender la situación actual, descubrir singularidades e identificar zonas degradadas. En seguida, se pretende identificar los factores de la degradación de las tierras, a través de la caracterización de las causas directas e indirectas que la promueven. Las siguientes etapas consisten en facilitar las medidas de acción para la NDT, en especial, con la información de los múltiples beneficios que presupone la neutralidad de las tierras. Finalmente, los últimos principios se basan en el

seguimiento del progreso hacia la NDT y la presentación de informes sobre ésta. (Cowie *et al.* 2018).

4.8.2 Reconversión productiva como estrategia de ordenamiento ecológico

En México, a principios de los años 70, diversas políticas gubernamentales estimularon el incremento de la producción agrícola por la vía del aumento de la superficie laborable. Como consecuencia, se abrieron al cultivo suelos de baja aptitud productiva, los cuales no alcanzaron el nivel de recursos necesarios para considerarse aptos para el uso agrícola (Echavarría *et al.*, 2009a).

En la Ley de Desarrollo Rural Sustentable (DOF, 2018), la reconversión se interpreta como la incorporación de cambios tecnológicos y de procesos que contribuyan a la productividad y competitividad del sector agropecuario, a la seguridad y soberanía alimentarias y al uso óptimo de las tierras mediante apoyos e inversiones complementarias. Asimismo, en dicha Ley, se hace referencia que los apoyos para la reconversión productiva deberán inducir el uso forestal o agroforestal de las tierras o, en su caso, la aplicación de prácticas de restauración y conservación.

De lo anterior, se infiere que el objetivo de la reconversión productiva es promover el establecimiento de las actividades de producción agropecuaria y forestal en áreas de buen potencial productivo y aptitud productiva, que sean competitividad y promuevan la sustentabilidad (Echavarría *et al.*, 2009b).

De acuerdo con las leyes vigentes que regulan el uso de los recursos naturales en México, los términos identificados y que están relacionados con la reconversión son: cambios tecnológicos, conversión de cultivos, reconversión productiva y recuperación de zonas degradadas. En ellos se aprecia un gradiente de acciones tecnológicas que van desde la más elemental adopción de un componente tecnológico, hasta gradualmente, llegar a un pronto extremo que es la recuperación de áreas degradadas (Echavarría *et al.*, 2009a).

Para conciliar lo anterior en una sola definición de reconversión productiva, es necesario considerar criterios agronómicos, como por ejemplo los cambios de especies actuales por especies nativas o cultivos alternativos que sean aptos para sobrevivir y producir en las áreas susceptibles de reconversión.

Así, la reconversión productiva se podría definir como el “cambio de la actividad o del sistema de producción buscando aprovechar la aptitud potencial del área o sitio con un uso óptimo del suelo y reduciendo la siniestralidad” (Echavarría *et al.*, 2009a).

4.9 Literatura citada

Asner, G. P., Elmore, A. J., Olander, L. P., Martin, R. E. & Thomas-Harris, A. (2004). Grazing systems, ecosystem responses, and global change. *Annual Review of Environment and Resources*, 29, 261-299. doi: 10.1146/annurev.energy.29.062403.102142

Barrera B., N. (1996). Los orígenes de la ganadería en México. *Ciencias*, 44, 14-27.

Batey, T. (2009). Soil compaction and soil management—a review. *Soil use and management*, 25(4), 335-345. doi: 10.1111/j.1475-2743.2009.00236.x

Bilotta, G. S., Brazier, R. E. & Haygarth, P. M. (2007). The impacts of grazing animals on the quality of soils, vegetation, and surface waters in intensively managed grasslands. *Advances in agronomy*, 94, 237-280. doi: 10.1016/S0065-2113(06)94006-1

Calle, Z., Murgueitio E. & J. Chará J. (2012). Integración de las actividades forestales con la ganadería extensiva sostenible y la restauración del paisaje. *Unasyva*, 239(63), 31-40.

Cantú B., J. E. (2011). *Manejo y mejoramiento de pastizales*. Chihuahua, Chih. México: Doble Hélice Ediciones.

Cantú B., J. E., Valdés R., J. & Medina T., J. G. (2010). *Gramíneas del norte de México*. (3ª ed.). Torreón, Coah. Méx.: UAAAN.

- Chapela, G. (2003). Armonización de políticas en la lucha contra la desertificación: El caso de México. En Mérega, J. L. (Ed.). *Desertificación y sociedad civil* (43-47). Buenos Aires, Argentina: Fundación del Sur y Mecanismo Mundial de la Convención de las Naciones Unidas de Lucha Contra la Desertificación.
- Cherlet, M., Hutchinson, C., Reynolds, J., Hill, J., Sommer, S. & von Maltitz, G. (2018). *World Atlas of Desertification*. Luxembourg: Publication Office of the European Union. doi: 10.2760/06292
- Colomer M., J. C. & Sánchez, J. D. (2000). Agricultura y procesos de degradación del suelo. En Olalla, M. S. (Ed.). *Agricultura y desertificación* (109-131). Madrid, España: Universidad de Castilla-La Mancha-IDR- Ediciones Mundi-Prensa.
- Conacher, A. (2009). Land degradation: A global perspective. *New Zealand Geographer*, 65(2), 91-94. doi: 10.1111/j.1745-7939.2009.01151.x
- Contreras, A. M. C., Coirini, R. O., Zapata, R. M. & Karlin, M. S. (2013). Recuperación vegetal en ambientes áridos: uso de cerramientos en ecosistemas degradados de la Cuenca Salinas Grandes, Argentina. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 12(2), 63-76. doi: 10.5154/r.rchsza.2012.05.005
- COTECOCA. (1979). *Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Subsecretaría de Ganadería Durango, Comisión Técnico Consultiva para la Determinación Regional de los Coeficientes de Agostadero*. México, D.F.: Ed. Calypso, S.A.
- Cowie, A. L., Orr, B. J., Castillo-Sanchez, V. M., Chasek, P., Crossman, N. D., Erlewein, A., Louwagie, G., Maron, M., Metternicht, G. I., Minelli, S., Tengberg, A. E., Walter, S. & Welton, S. (2018). Land in balance: The scientific conceptual framework for Land Degradation Neutrality. *Environmental Science & Policy*, 79, 25-35. doi: 10.1016/j.envsci.2017.10.011

- Diario Oficial de la Federación (DOF). 2018. *Ley De Desarrollo Rural Sustentable*. Última reforma publicada DOF 20-06-2018. Recuperado de http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/235_200618.pdf
- Echavarría C., F. G., Medina, G. G., Rumayor R., A. F., Serna P., A., Salinas G., H. & Bustamente W., J. G. (2009a). *Diagnóstico de los recursos naturales para la planeación de la intervención tecnológica y el ordenamiento ecológico*. Zacatecas Zac.: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. CIRNOC. doi: 10.13140/2.1.3453.0084
- Echavarría C., F. G, Serna P., A., Rubio A., F. A., Rumayor R., A. F. & Salinas G., H. (2009b). Productividad del chamizo *Atriplex canescens* con fines de reconversión: dos casos de estudio. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 47(1), 93-106.
- ECOPAD. (2007). Aguirre, C., Hoth J. & Lafón A. (Eds.). *Estrategia para la conservación de los pastizales del desierto Chihuahuense*. Chihuahua, México: Impresora Chihuahua. doi: 10.13140/RG.2.2.36081.74089
- Emanuelli-Avilés P., Garrido, C., Milla A., F., Orellana, O., Duarte C., E., López, S., Torrealba M., J. A. & Victoria C., M. (2016). *Alineación de los contenidos del actual PANCD con la Estrategia Decenal de la Convención (CNULD), la iniciativa de Degradación Neutral de la Tierra y los Objetivos del Desarrollo Sostenible*. Santiago de Chile, Chile: Sud-Austral Consulting SpA”.
- Estell, R. E., Havstad, K. M., Cibils, A. F., Fredrickson, E. L., Anderson, D. M., Schrader, T. S. & James, D. K. (2012). Increasing shrub use by livestock in a world with less grass. *Rangeland Ecology & Management*, 65(6), 553-562. doi: 10.2111/REM-D-11-00124.1
- FAO. (2007). *Secuestro de carbono en tierras áridas*. Organización de la Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italia. Recuperado de <http://www.fao.org/3/a-Y5738s.pdf>

- FAO. (2009). *El estado mundial de la agricultura y la alimentación*. Roma, Italia: Organización de la Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- FAO. (2015). *El suelo es un recurso no renovable, su conservación es esencial para la seguridad alimentaria y nuestro futuro sostenible*. Roma, Italia: Organización de la Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- Gisladdottir, G. & Stocking, M. (2005). Land degradation control and its global environmental benefits. *Land Degradation & Development*, 16(2), 99-112. doi: 10.1002/ldr.687
- González M., F. (2012). *Las zonas áridas y semiáridas de México y su vegetación*. México, D.F.: Instituto Nacional de Ecología.
- Grainger, A. (2015). Is Land Degradation Neutrality feasible in dry areas? *Journal of Arid Environments*, 112: 14-24. doi: 10.1016/j.jaridenv.2014.05.014
- Granados S., D., Hernández G., M. Á., Vázquez A., A. & Ruíz P., P. (2013). Los procesos de desertificación y las regiones áridas. *Revista Chapingo Serie ciencias forestales y del ambiente*, 19(1), 45-66. doi: 10.5154/r.rchscfa.2011.10.077
- Greenwood K. L. & Mc Kenzie. M. (2001). Grazing effects on soil physical properties and the consequences for pastures: a review. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 41, 1231-1250. doi: 10.1071/EA00102
- Holtz, U. (2003). *La Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación (CNUCLD) y su dimensión política*. Quinta mesa redonda de parlamentarios en el contexto de la aplicación de la Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación. Bonn. Recuperado de <http://www.ecopuerto.com/Bicentenario/informes/Convencion%20Desertificacion.pdf>
- Ibáñez, J. J., González, J. L. R., García A. A. & Saldaña A. (1997). Los geosistemas mediterráneos en el espacio y en el tiempo. En Ibáñez, J. J., Garcés B., L. V. y Machado, C. (Eds.). *El paisaje mediterráneo a través del*

espacio y del tiempo. Implicaciones en la desertificación (27-130).
Logroño, España: Geoforma Ediciones.

Lal, R., Safriel, U. & Boer, B. (2012). *Zero Net Land Degradation: A New Sustainable Development Goal for Rio+20. A Report Prepared for the Secretariat of the United Nations Convention to Combat Desertification.* Bonn, Germany: UNCCD.

Menocal, S. E. & Álvarez M., A. (2001). Los efectos de la sequía en la ganadería bovina de carne en el sur de Durango, México: hacia una interpretación integral. En Hernández, Lucina (Comp.). *Historia ambiental de la Ganadería en México.* (241-250). Xalapa, Ver.: Instituto de Ecología, A.C.

Millennium Ecosystem Assessment, (MEA). (2005). *Ecosystems and Human Well-being: Desertification Synthesis.* Washington, DC.: World Resources Institute.

Miller, G. T. (1990). *Resource conservation and management.* USA.: Wadsworth Pub. Co.

Morales, C. (2005). Pobreza, desertificación y degradación de tierras. En Morales, C. & Parada, S. (Eds.). *Pobreza, desertificación y degradación de los recursos naturales* (25-55). Santiago de Chile, Chile: CEPAL, Naciones Unidas (ONU), GTZ.

Oropeza O., O. (2007). *Evaluación de la vulnerabilidad a la desertificación.* Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Recuperado de <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/437/oropeza.html>

Orr, B. J., Cowie, A. L., Castillo-Sánchez. V. M., Chasek, P., Crossman N. D., Erlewein, A., Louwagie, G., Maron, M., Metternicht, G. I., Minelli, S., Tengberg, A. E., Walter, S. & Welton, S. (2017). *Scientific Conceptual Framework for Land Degradation Neutrality. A Report of the Science-Policy Interface.* Bonn, Germany: United Nations Convention to Combat Desertification.

- PNUMA. (2004). *Land degradation in drylands (LADA): GEF grant request*. Nairobi: Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.
- Rebollo, R. & Sal, A. G. (2003). Aprovechamiento sostenible de los pastizales. *Revista Ecosistemas*, 12(3).
- Scholes, R., Montanarella, L., Brainich, A., Barger, N., ten Brink, B., Cantele, M., Erasmus, B., Fisher, J., Gardner, T., Holland, T.G., Kohler, F., Kotiaho, J.S., Von Maltitz, G., Nangendo, G., Pandit, R., Parrotta, J., Potts, M.D., Prince, S., Sankaran, M. & Willemen, L. (2018). *Summary for Policymakers of the Thematic Assessment Report on Land Degradation and Restoration of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES)*. Bonn, Germany: IPBES Secretariat.
- Segrelles S., J. A. (2001). Problemas ambientales, agricultura y globalización en América Latina. *Scripta Nova. Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales*. 5: (92). 32 p.
- SEMARNAT. (2003). *Dirección General de Ordenamiento y Conservación de Ecosistemas, INE*. México.
- SEMARNAT. (2011). *Estrategia Nacional de Manejo Sustentable de Tierras*. México, D.F.: Producción Creativa en la Ciudad de México.
- SEMARNAT (2018). *Informe del medio ambiente en México*. Compendio de estadísticas ambientales, indicadores clave, de desempeño ambiental y de crecimiento verde. Recuperado de <https://apps1.semarnat.gob.mx:445/dgeia/informe18/index.html>
- Stavi, I. & Lal, R. (2015). Achieving zero net land degradation: challenges and opportunities. *Journal of Arid Environments*, 112, 44-51. doi: 10.1016/j.jaridenv.2014.01.016
- Steinfeld, H., Gerber, P., Wassenaar T., Castel, V., Rosales, M. & Haan, C. (2009). *La larga sombra del ganado: problemas ambientales y opciones*. Roma, Italia: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO).

- UNCCD. (2012). *Zero Net Land Degradation. A Sustainable Development Goal for Rio+20 To secure the contribution of our planet's land and soil to sustainable development, including food security and poverty eradication.* (Second edition, May 2012). Brazil: Printed by Ediouro Grafica e Editora.
- UNCCD (2014). *Neutralidad en la degradación de la tierra: La resiliencia a escala local, nacional y regional.* UNCCD. Recuperado de https://www.zaragoza.es/contenidos/medioambiente/onu/1442-spa-ed2014_Land_degradation_neutrality_sp.pdf
- UNCCD. (2017a). *The Global Land Outlook.* First edition. Bonn, Germany. Recuperado de <https://knowledge.unccd.int/glo>
- UNCCD. (2017b). *The future strategic framework of the Convention. Draft decision submitted by the Chair of the Committee of the Whole.* Ordos, China: Document ICCD/COP(13)/L.18.
- United Nations Conference on Desertification (UNCOD). (1977). *Draft Plan of action to combat desertification.* Nairobi, Kenya.
- United Nations Environmental Programs (UNEP). (1992). *Status of desertification and implementation of the United Nations Plan of Action to Combat Desertification.* USA: United Nations Environment Programme.
- Velásquez V., M. A., Alba Á., A., Gutiérrez L., R. & García E., G. (2012). *Prácticas de restauración de suelos para la conservación del agua.* Folleto Técnico No. 46. Zacatecas: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. CIRNOC.
- Wassenaar, T., Gerber, P., Verburg, P. H., Rosales, M., Ibrahim, M. & Steinfeld, H. (2007). Projecting land use changes in the Neotropics - The geography of pasture expansion into forest. *Global Environmental Change*, 17(1), 86-104. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2006.03.007
- Wharton, J. (2008). *Subsistence Agriculture and Economic Development.* New York: Routledge.

CAPÍTULO II

MICRO-REGIONALIZACIÓN CON BASE EN INDICADORES DE ARIDEZ, SEQUÍA Y FISIOGRAFÍA EN LA CUENCA MEDIA DE LOS RÍOS NAZAS-AGUANAVAL

RESUMEN

La regionalización implica la división de un territorio en áreas menores con características comunes. Es una herramienta metodológica en la planeación ambiental, ya que permite un conocimiento del estado de los recursos naturales por microrregión para un mejor manejo de los mismos. El objetivo de este estudio fue hacer una microrregionalización de la cuenca media de los ríos Nazas-Aguanaval, ubicada entre los estados de Durango y Zacatecas, para una mejor planeación en el uso de los recursos naturales de la región. Se realizaron procesos de digitalización, aplicaciones SIG y cartografía digital para la obtención de microrregiones. Adicionalmente se usaron índices de aridez y sequía, los cuales se calcularon con base a series históricas de datos climáticos de temperaturas máximas, mínimas y precipitación de estaciones meteorológicas de influencia en el sitio. Los resultados obtenidos se integraron y analizaron utilizando ArcMap 10.1. Se identificaron 15 microrregiones, agrupadas en tres grandes subregiones, la más árida (Categoría A₂) y menos árida (Categoría B₂) de las zonas áridas y la menos árida de las zonas semiáridas (Categoría B₃) y cuatro niveles de sequía anual: mínima, moderada, media y alta. La vegetación dominante y tipo de suelo se asoció a cada microrregión.

Palabras clave: Microrregiones, índice de aridez, Sistemas de Información Geográfica, índice de sequía, cuenca hidrológica.

MICRO-REGIONALIZATION BASED ON INDICATORS OF ARIDITY, DROUGHT AND PHYSIOGRAPHY IN THE MIDDLE WATERSHED OF THE NAZAS-AGUNAVAL RIVERS

ABSTRACT

Regionalization implies the division of a territory into smaller areas with common characteristics. It represents a basic methodological tool for environmental planning, allowing the knowledge of resources for proper handling. This study aimed to identify different micro-regions of middle watershed Nazas-Aguanaval situated the states of Durango and Zacatecas, for better strategic planning for conservation and sustainable development of natural resources. Digitization, digital mapping and GIS applications for obtaining microregions. The aridity and drought indices were calculated based on historical climate maximum and minimum temperatures and rainfall data sets influence of meteorological stations on the site. The results were integrated and analyzed using ArcMap 10.1. The 15 microregions could be identified, grouped in three main subregions, the driest (Category A₂) and less arid (Category B₂) of arid and less arid areas semiarid (Category B₃) and four levels of annual drought, minimal, moderate, medium and high. The dominant vegetation and soil type associated with each region.

Keywords: Micro-regions, aridity index, GIS, drought index, watershed.

INTRODUCCIÓN

La aridez de un lugar es resultante de la influencia de varios factores, además es una representación confiable de la disponibilidad potencial de agua, especialmente a grandes escalas (Asadi Zarch *et al.*, 2015). México es un país cuyo territorio presenta extensas regiones de zonas áridas, muy áridas y semiáridas. Aunque existen pequeñas regiones áridas en todo el país, producto de las condiciones climáticas locales, la mayor extensión de zonas áridas en México se ubica en el cinturón o faja mundial de aridez, correspondiente a los desiertos Chihuahuense y Sonorense (Cervantes-Ramírez, 2002).

Una cuenca hidrológica es la unidad utilizada como marco de referencia para la planeación territorial y ambiental de los recursos naturales (Fuentes-Junco, 2004) y representa áreas de escurrimiento e infiltración donde el agua de lluvia tiende a ser drenada y que desemboca a ríos, lagos y finalmente el mar. El funcionamiento de la cuenca puede caracterizarse tomando en cuenta aspectos relacionados con su morfología, textura, tipo de suelo y cobertura vegetal (López-Cárdenas, 1998).

Las cadenas productivas ocurren bajo ambientes agro-ecológicos distintivos que definen su potencial. Ese ambiente es dado por una serie de interacciones de clima, suelo y economía principalmente; de éstos, el clima define en gran medida la disponibilidad del recurso agua. Es por esto que una cuenca debe ser definida por la capacidad de aportar el recurso agua en función de sus características fisiográficas y ecológicas (Sánchez, 2005).

La cuenca Nazas-Aguanaval se ubica en la RH36 dentro de la Zona Hidrológico - Administrativa Cuencas Centrales del Norte y debe su nombre a los ríos Nazas y Aguanaval (DOF, 2016). Esta región hidrológica está formada por una extensa zona cerrada de 116,691.78 km² y está ubicada en la parte semiárida del país (CCNA, 2010). Particularmente, la cuenca media tiene precipitación media anual de 300 a 500 mm, genera el 15 % de los escurrimientos y es considerada una

zona de almacenamiento, conducción y aprovechamiento de agua hacia la parte baja de la cuenca (Chávez-Ramírez *et al.*, 2011).

La cuenca media de los ríos Nazas-Aguanaval presenta una gran biodiversidad relativa a las condiciones climáticas y ecológicas, lo que hace necesario identificar las microrregiones que resulten diferentes entre sí, y por ello no sea posible agruparlas en una gran categoría de condición agroecológica, aun cuando sea propiamente referida a las zonas áridas o semiáridas.

La importancia de la regionalización como implica la división de un territorio en áreas menores con características comunes y representa una herramienta metodológica básica en la planeación ambiental, pues permite el conocimiento de los recursos para su manejo adecuado (CONABIO, 2008). Lo anterior indica que la importancia de regionalizaciones de tipo ambiental, estriba en que se consideran análisis basados en ecosistemas, cuyo objetivo principal es incluir toda la heterogeneidad ecológica que prevalece en un determinado espacio geográfico; además, la regionalización puede representar una herramienta de ordenamiento territorial. El objetivo de este estudio, fue hacer una caracterización micro-regional con base a criterios de aridez, sequía y fisiografía, que permita una mejor planeación en el uso de los recursos naturales agua, suelo, planta animal en función de sus características comunes y potencial agroecológico.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación geográfica

La cuenca media Nazas-Aguanaval pertenece a la RH 36, ubicada en el norte de México, entre los meridianos 23° y 27° de Latitud Norte y entre los paralelos 106° y 102° de Longitud Oeste. Sus límites son definidos entre las presas Francisco Zarco y Lázaro Cárdenas (Chávez-Ramírez *et al.*, 2011), en los estados de Durango y Zacatecas.

Criterios de regionalización

Para hacer la caracterización física de una región son utilizados diferentes indicadores. Es factible tomar en cuenta factores físicos y biológicos de mayor relevancia (Pedroza, 1995; Cabrera-Bermúdez *et al.*, 2004). El índice de aridez, índice de sequía anual, dominancia de vegetación y tipo de suelo, fueron los indicadores utilizados para realizar el presente estudio de regionalización.

Determinación de microrregiones fisiográficas

Se seleccionaron 26 estaciones climáticas de influencia en la zona que contenían un mínimo 30 años con registro de información, sin datos atípicos y con al menos 75 % de ésta, dentro de la serie de datos 1979-2008. Para cada serie de datos se realizó un análisis de consistencia de la información. Cuando los registros climatológicos mostraban periodos sin datos, se usó el simulador climático CLIMGEN 4.06.06, el cual genera estocásticamente los valores de precipitación y temperatura más probables. Para la extracción de información climatológica histórica se utilizó el programa computacional ERIC III 2.0 (IMTA, 2009).

El método de interpolación utilizado fue la media ponderada por el inverso de la distancia (IDW), el cual utiliza un algoritmo simple basado en distancias. Se basa en la autocorrelación espacial de los puntos para la predicción y generación de superficies continuas (Moreno, 2008; Heywood *et al.*, 2006). Este método se ha utilizado para modelación espacio-temporal de variables climáticas minimizando el error estimado de estas variables (Shope & Maharjan, 2015; Modallaldoust, 2010).

Esta técnica de interpolación permitió identificar el área de influencia de cada estación climatológica (Figura 3). El software ArcMap 10.1 (ESRI, Redlands, CA, USA) como sistema de información geográfica, fue empleado para realizar la interpolación.

De acuerdo al análisis geo-estadístico dentro del SIG, el método IDW realizó una predicción aceptable en los niveles espaciales de cada estación climática para la

zona de interés, ya que sus indicadores en la validación como el Mean Error (≤ 0.01) y el RMS (0.04) fueron considerablemente inferiores en comparación con los otros métodos que se evaluaron en la etapa de selección de modelos de interpolación.

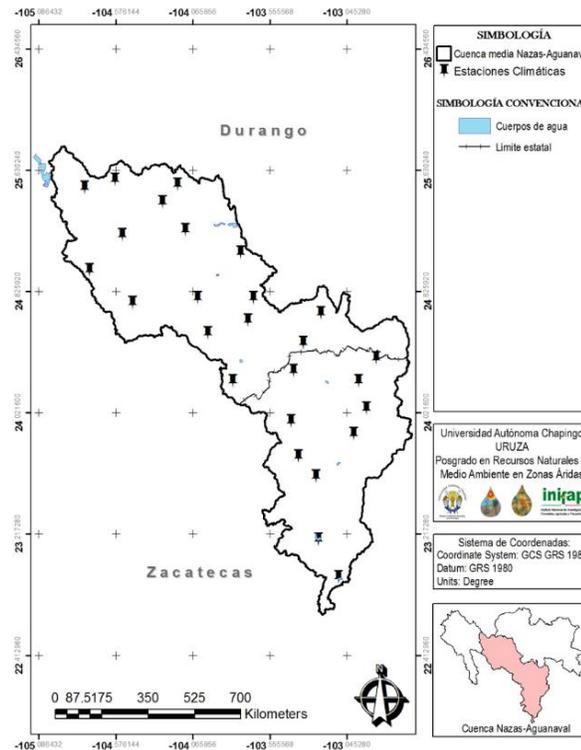


Figura 3. Ubicación de estaciones climáticas en la cuenca media Nazas-Aguanaval.

Determinación del índice de aridez

El Índice de Aridez de Emberger modificado por Stretta & Mosiño (1963) fue utilizado para determinar los diferentes grados de aridez en la región de estudio. Este índice integra la acción predominante del régimen pluviométrico y la influencia de las temperaturas máximas y mínimas promedio del más caliente y frío, respectivamente, ponderadas por la evaporación, obtenida esta última mediante la diferencia del promedio de las temperaturas máximas y mínimas. Esta relación de componentes ambientales concreta en la Ecuación (1).

$$IA = (m + 45)(M^2 - m^2) / Pp \quad (1)$$

Dónde: IA = Valor del índice de aridez, entre más alto sea el valor calculado corresponderá una mayor aridez (Cuadro 2); M = Promedio de la temperatura máxima del mes más caliente en °C; m = Promedio de la temperatura mínima del mes más frío en °C; 45 = constante y; Pp = Precipitación media anual en mm.

Cuadro 2. Valores del índice de aridez y categorías planteadas por Stretta & Mosiño, (1963).

Valores de índice de aridez	Categorías
Más de 1000	A ₁ , Zonas desérticas
500 a 1000	B ₁ , Zonas desérticas
222 a 500	A ₂ , Zonas áridas
118 a 222	B ₂ , Zonas áridas
67 a 118	A ₃ , Zonas semiáridas
53 a 67	B ₃ , Zonas semiáridas
38 a 53	Zonas de transición
≥ 38	Zonas húmedas y muy húmedas

Para el cálculo de la condición de aridez de cada microrregión, se utilizó la serie de datos climatológicos históricos (1979-2008) de las estaciones meteorológicas en el área de estudio. Se integró una base de datos y los resultados se aplicaron a cada área de acuerdo a lo determinado al método de Stretta & Mosiño (1963). Este método ha sido utilizado en trabajos de investigación para clasificar las zonas áridas y semiáridas a través de índices climáticos y regionalizar áreas con escaso régimen precipitación pluvial en el norte de México (González, 2012; Pedroza *et al.*, 2014).

Determinación de la intensidad de la sequía anual

Para la determinación de la sequía anual y su intensidad, se usó la base de datos climática del ERIC III 2.0. La información de precipitación se tomó de las estaciones. El número de años con sequía fue registrado para las estaciones seleccionadas. Este procedimiento consistió en comparaciones de los registros anuales con la precipitación media anual de 30 años, obtenida de las normales

climatológicas proporcionadas por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2010). Para categorizar los niveles de sequía, se realizó una escala en porcentaje de años con presencia de sequía (Mendoza & Puche, 2007; Bravo *et al.*, 2006) (Cuadro 3).

Cuadro 3. Clasificación para el porcentaje de sequía anual.

Escala Sequía Anual		
Rango (%)	Valor	Categoría
<45	1	Mínima
46-50	2	Moderada
51-55	3	Media
>55	4	Alta

Dominancia de vegetación y tipo de suelo

El programa ArcMap 10.1 (ESRI, Redlands, CA, USA) fue utilizado para asociar la dominancia y agrupaciones principales de vegetación y unidades de suelo para cada microrregión obtenida. La información se obtuvo de las cartas digitales de uso de suelo y vegetación serie V y edafología serie I escala 1:250,000 (INEGI, 2015).

Integración de criterios de regionalización

La micro-regionalización se realizó mediante mapas digitalizados con la integración de los cuatro criterios; vegetación dominante, tipo de suelo, grado de aridez e intensidad de sequía anual de las microrregiones resultantes. Para la integración se utilizó álgebra booleana con el operador lógico And.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización

La parte media de la cuenca se delimitó con base a la división hidrológica digital (INEGI, 2015). Las subcuencas de la RH36 descritas en la Figura 4 conforman

esta área. Sus límites fueron definidos de acuerdo al DOF (2016), para Regiones y Cuencas Hidrológicas de México. La cuenca media está ubicada en zona centro norte del país, sus colindancias abarcan parte de los estados de Durango y Zacatecas. Cuenta con una extensión de 33,304.6 km² y representa el 38.3 % del total de la cuenca Nazas-Aguanaval.

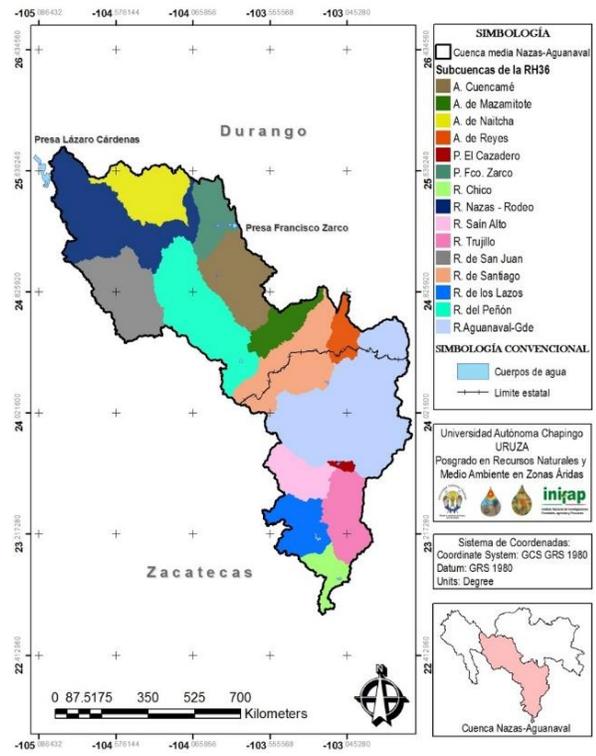


Figura 4. Subcuencas que conforman la Cuenca media Nazas-Aguanaval.

Tipo de suelos y vegetación dominante

Las unidades de suelo asociados a la parte media de la cuenca fueron Feozem, Litosol, Xerosol, Regosol y Rendzina, principalmente. La vegetación dominante fue matorral desértico micrófilo y rosetófilo, además de grandes áreas de pastizal natural. Igualmente, se expandieron zonas dedicadas a la agricultura (Figura 5).

Los tipos de suelo encontrados en la zona coinciden con los reportado por González-Elizondo *et al.* (2006). La dominancia de agrupaciones de matorral desértico son comúnmente reportados en las regionales áridas de México, al ocupar la mayor parte de la extensión en estas zonas (Mora-Donjuán *et al.*, 2014).

De acuerdo a Rzedowski (2006), la vegetación de las regiones de clima seco de México se conoce como matorral xerófilo, pero dentro de esta denominación general se incluyen numerosos tipos de vegetación, entre los que destaca el matorral desértico micrófilo y rosetófilo. Respecto a los pastizales, la región centro-norte del país, presenta una topografía rugosa y un clima y geología variables, lo que le confiere una gran riqueza de gramíneas, ya que los pastos presentan una distribución ecológica muy amplia (Herrera-Arrieta & Cortés-Ortiz, 2009). Igualmente, la agricultura en zonas desérticas se ha desarrollado y expandido constantemente desde el siglo pasado (Cerutti, 2015).

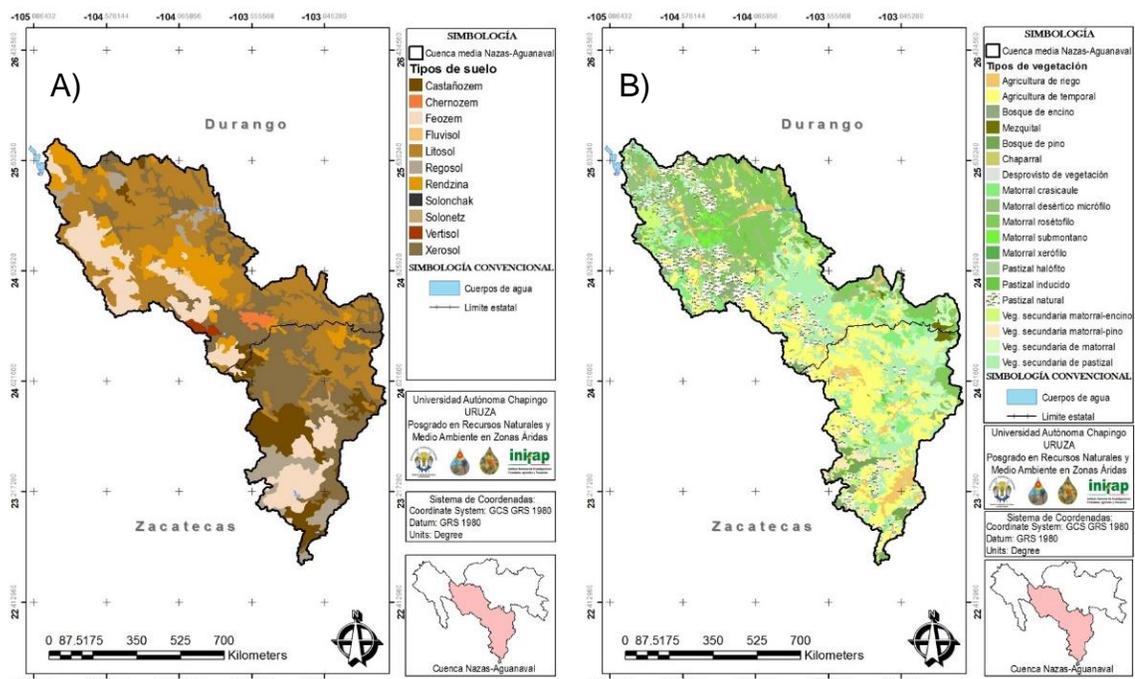


Figura 5. Representación espacial de los suelos dominantes (A) y la vegetación (B) en el área de estudio.

Grado de aridez

Con base al grado de aridez, se identificaron tres grandes subregiones en la región de estudio: la más y menos árida de las zonas áridas y la menos árida de las zonas semiáridas, correspondiente a 8, 17 y 1 estaciones de influencia por cada categoría, respectivamente (Figura 6A). Lo anterior indica que en la parte media de la cuenca domina la categoría B2, con índice de aridez entre 118 a 222 (Stretta & Mosiño, 1963). Esta condición de aridez es idónea para la dominancia

de grandes extensiones de pastizal (González, 2012; Granados-Sánchez *et al.*, 2011). En esta área es factible practicar la agricultura de temporal mediante la captación de agua de lluvia procedente de cuencas hidrológicas. Es común también este tipo de agricultura a partir de captación de escurrimientos hídricos, en lo que se denomina agricultura de esorrentía (Pedroza, 2010).

La categoría A2 es identificada como la más árida de las zonas áridas, con un índice de aridez que varía de 222 y 500 (Stretta & Mosiño, 1963), en las cuales la ausencia de agricultura de temporal es un común denominador (Cervantes-Ramírez, 2002). Las estaciones calculadas con esta categoría están situadas cerca del área de influencia de la cuenca baja.

Solo una estación fue clasificada con la categoría A3, considerada como la más árida de las zonas semiáridas, que se ubica en el rango de 67 a 118 de acuerdo a la tipificación hecha con base en el Índice de Emberger modificado por Stretta & Mosiño (1963). Esta zona es la más cercana a la cuenca alta y además de prevalecer zonas de pastizal natural con abundancia de pastos naturales o de origen primario, aquí se distribuyen diversas especies de los géneros: *Aristida*, *Bouteloua*, *Elionurus*, *Eragrostis*, *Heteropogon*, *Hilaria*, *Lycurus* y *Mnesithea* (Herrera-Arrieta & Cortés-Ortiz, 2009).

Además, hay influencia de grandes extensiones dedicadas a la agricultura de temporal, donde se cultivan maíz, frijol, alfalfa, avena, sorgo y chile, principalmente (INEGI, 2015). En las zonas con clima semiárido, la práctica de la agricultura temporal del tipo tradicional es ampliamente generalizada a pesar de la irregularidad con que se presenta el periodo de lluvias (Velasco-Molina, 1991). De igual manera, grandes extensiones de pastizales son dedicadas a la ganadería extensiva (Velázquez *et al.*, 2015).

Sequía anual

La sequía es un fenómeno climático recurrente que se caracteriza por una reducción en la precipitación pluvial con respecto a la considerada como normal para una zona determinada; no presenta epicentro, ni trayectorias definidas y

tiende a extenderse de manera irregular a través del tiempo y del espacio (Ortega-Gaucin, 2014; Méndez & Magaña, 2010). La sequía anual fue expresada en porcentaje de acuerdo a los años donde se presentó precipitación anual por debajo de su media histórica.

Se realizó una categorización de los grados de sequía, conforme a los siguientes rangos: <45 %, 46-50 %, 51-55 % y >55 %, de tal forma que se clasificaron las microrregiones por intensidad de sequía: mínima, moderada, media y alta, respectivamente. De acuerdo a esta clasificación, se tiene que el 46.1 % de las estaciones monitoreadas registraron una sequía moderada; le siguió en importancia de frecuencia la sequía media con un 34.6 % de las estaciones. Los valores mínimos de frecuencia fueron los de sequía mínima y alta, con el 11.5 y el 7.7 % de las estaciones meteorológicas, respetivamente (Figura 6B). La ocurrencia de estos registros coincide con Ortega-Gaucin (2014), ya que, para el norte de México, en las últimas décadas se han registrado varios años deficitarios de lluvias, afectando grandes extensiones agrícolas y comunidades rurales.

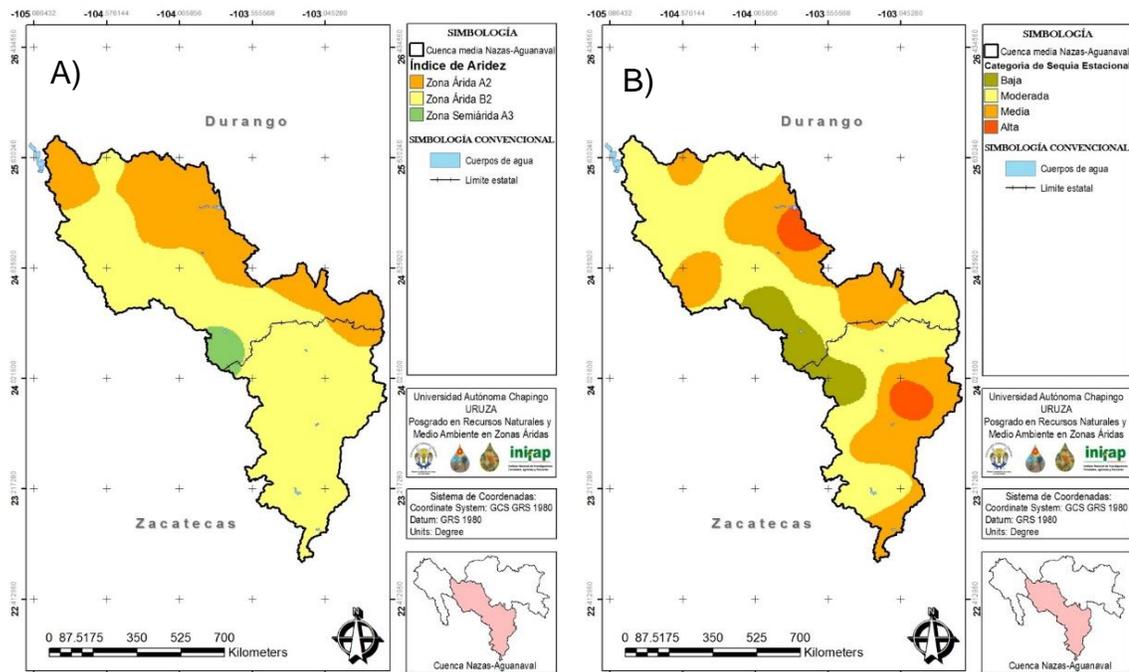


Figura 6. Índice de aridez (A) e índice de sequía (B) en el área de estudio.

Microrregionalización

La categorización propuesta mediante la integración de los indicadores anteriormente citados, surge de las combinaciones posibles de los diferentes niveles de cada criterio de regionalización (Figura 7). Las 15 microrregiones y su característica por indicador se muestran en el Cuadro 4.

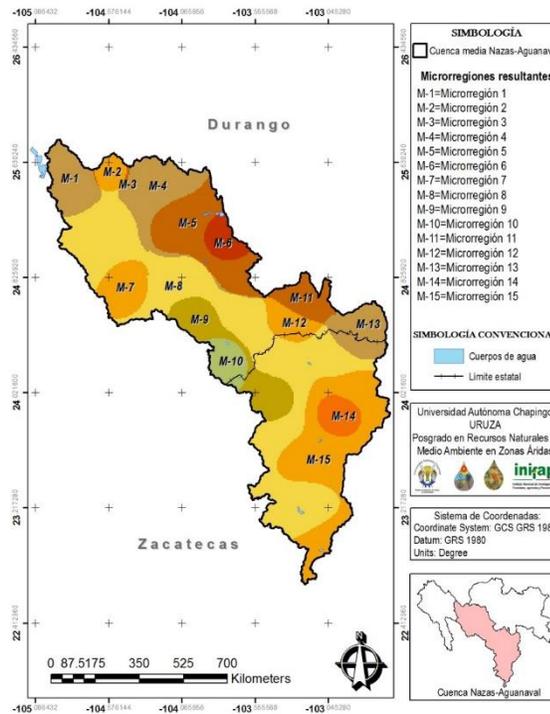


Figura 7. Microrregiones integradas en la Cuenca media Nazas-Aguanaval.

Cuadro 4. Microrregiones con la integración de los indicadores índice de aridez, sequía, tipo de suelo y vegetación dominante.

Microrregión	Índice de Aridez	Clases de Sequía	Cubiertas y uso de suelo	Unidad de suelo
1	A2	Moderada	Matorral desértico micrófilo	Rendzina/Feozem
2	B2	Media	Pastizal natural	Xerosol/Regosol
3	A2	Media	Matorral desértico rosetófilo	Litosol
4	A2	Moderada	Matorral desértico micrófilo	Litosol
5	A2	Media	Matorral desértico rosetófilo	Litosol/Xerosol

6	A2	Alta	Matorral desértico rosetófilo	Litosol/Xerosol
7	B2	Media	Pastizal natural	Feozem
8	B2	Moderada	Agricultura de temporal/Pastizal natural	Feozem/Litosol
9	B2	Baja	Agricultura de temporal/ Pastizal natural	Feozem/Litosol
10	A3	Baja	Agricultura de temporal	Feozem
11	A2	Media	Matorral desértico micrófilo	Litosol
12	B2	Media	Matorral crasicaule	Litosol
13	A2	Moderada	Bosque de mezquite/Matorral desértico rosetófilo	Xerosol/Litosol
14	B2	Alta	Agricultura de temporal/Pastizal natural	Xerosol/Solonetz
15	B2	Media	<i>Agricultura de temporal/Pastizal natural</i>	Xerosol/Feozem

La identificación de las 15 microrregiones del área de estudio, permitiría una planeación más dirigida y sistemática en el uso de los recursos naturales, en función de las características biofísicas que cada subregión contiene, sin embargo, es necesario considerar componentes sociales y económicos. Una planeación puede tener diferentes finalidades, tales como: la conservación, aprovechamiento y/o producción de los recursos bióticos de las zonas áridas (Pedroza *et al.*, 2014; Velasco & Pimentel, 2010).

CONCLUSIONES

La regionalización y caracterización fisiográfica, es una herramienta útil en la planeación para un mejor uso y manejo de recursos naturales de grandes extensiones y alta biodiversidad, como las zonas áridas.

Se identificaron tres grandes subregiones: A2, B2 y A3, correspondiente a las más y menos áridas de las zonas áridas y la más áridas de las zonas semiáridas, con 30.7, 65.4 y 3.8 % de las estaciones meteorológicas monitoreadas.

La intensidad de sequía fue del 46.1, 34.6, 11.5 y 7.7 % para las categorías moderada, media, mínima y alta, respectivamente, lo cual es indicativo de un buen potencial agroecológico en términos de esta variable climatológica.

Con base a las cartas de uso de suelo y vegetación y edafología, se delimitó la vegetación dominante y tipos de suelo en la cuenca media.

La interacción de tipos de vegetación y suelo, grados de aridez y niveles de sequía anual generaron 15 microrregiones, cada una con sus propias características climáticas y fisiográficas que les definen el potencial productivo y de reconversión.

LITERATURA CITADA

Asadi Zarch, M. A., Sivakumar, B. & Sharma, A. (2015). Assessment of global aridity change. *Journal of Hydrology*, 520, 300-313. doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.11.033

Bravo L., A. G., Salinas G., H. & Rumayor R., A. (2006). *Sequía: Vulnerabilidad, impacto y tecnología para afrontar en el Norte Centro de México*. México, D.F.: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.

Cabrera-Bermúdez, J., Guardado-Lacaba, R., Peláez-García, R. & González-Cabrera, N. (2004). Regionalización hidrogeológica de la provincia Pinar del Río en un SIG. *Minería & Geología*, 20(1-2), 24-31.

Cerutti, M. (2015). La agriculturización del desierto: Estado, riego y agricultura en el norte de México (1925-1970). *Apuntes*, 42(77), 91-127. doi: 10.21678/apuntes.77.740

Cervantes-Ramírez, M. C. (2002). *Plantas de importancia económica en las zonas áridas y semiáridas de México*. México, D.F.: UNAM, Instituto de Geografía.

Chávez-Ramírez, E., González-Cervantes, G., González-Barrios, J. L. & López D., A. (2011). La evapotranspiración en la cuenca baja media del río Nazas. En Oswald S., U. (Ed.). *Retos de la Investigación del Agua en México* (121-129). Cuernavaca, México: Centro Regional de Investigaciones Multidisciplinarias, Universidad Nacional Autónoma de México/Scientific Network on Water–National Council on Science and Technology.

CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad). (2008). *Regionalización*. Recuperado de <http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/regionalizacion/doctos/regionalizacion.html>

Consejo de Cuenca Nazas Aguanaval (CCNA). (2010). *Marco Político-Administrativo del Consejo de Cuenca Nazas-Aguanaval*. Recuperado de <http://www.cuencanazasaguanaval.org/>

Diario Oficial de la Federación (DOF). 2016. *ACUERDO por el que se dan a conocer los límites de las 757 cuencas hidrológicas que comprenden las 37 regiones hidrológicas en que se encuentra dividido los Estados Unidos Mexicanos*. Recuperado de http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5439123&fecha=27/05/2016

Fuentes-Junco, J. J. A. (2004). *Análisis morfométrico de cuencas: caso de estudio en el Parque Nacional de Pico de Tancítaro*. INECOL. Recuperado de <https://agua.org.mx/biblioteca/analisis-morfometrico-de-cuencas-caso-de-estudio-del-parque-nacional-pico-de-tancitaro/>

González-Elizondo, M. S., González-Elizondo, M. & Márquez-Linares, M. A. (2006). *Vegetación y ecorregiones de Durango*. Durango: Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional (CIIDIR), Instituto Politécnico Nacional.

González M., F. (2012). *Las zonas áridas y semiáridas de México y su vegetación*. México, D.F.: Instituto Nacional de Ecología.

- Granados-Sánchez, D., Sánchez-González, A., Granados-Victorino, R. L. & Borja de la Rosa, A. (2011). Ecología de la vegetación del Desierto Chihuahuense. *Revista Chapingo Serie ciencias forestales y del ambiente*, 17(SPE.), 111-130. doi: 10.5154/r.rchscfa.2010.10.102
- Herrera-Arrieta, Y. & Cortés-Ortiz, A. (2009). Diversidad de las gramíneas de Durango, México. *Polibotánica*, (28), 49-68.
- Heywood, I., Cornelius S. & Carver, S. (2006). *An introduction to geographical information systems*. (Third edition). London, England: Pearson Prentice Hall.
- IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua). (2009). Extractor rápido de información climatológica (ERIC III). 2.0. Servicio Meteorológico Nacional. México, D.F.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía, e Informática). (2015). Descarga de mapas digitales de los temas edafología serie I, uso de suelo y vegetación serie V y división hidrológica de la República Mexicana. Recuperado de <https://www.inegi.org.mx/temas/mapas/mg/>
- López-Cárdenas de L., F. (1998). *Restauración hidrológico forestal de las cuencas y control de erosión: ingeniería medioambiental*. Madrid, España: Mundiprensa.
- Méndez, M. & Magaña, V. (2010). Regional aspects of prolonged meteorological droughts over Mexico and Central America. *Journal of Climate*, 23(5), 1175-1188. doi: 10.1175/2009JCLI3080.1
- Mendoza, N. & Puche, M. (2007). Evaluación de la ocurrencia de sequía en localidades de Venezuela. *Revista de la Facultad de Agronomía (LUZ)*, 24: 661-678.
- Modallaldoust, S. (2010). Evaluating optimized digital elevation precipitation model using IDW method (Case study: Jam & Riz Watershed of Assaloyeh, Iran). *DESERT*, 15(1), 5-14. doi: 10.22059/JDESERT.2010.21674

- Mora-Donjuán, C. A., Rubio-Camacho, E. A., Alanís-Rodríguez, E., Jiménez-Pérez, J., González-Tagle, M. A., Mata-Balderas, J. M. & Mora-Olivo, A. (2014). Composición y diversidad vegetal de un área de matorral desértico micrófilo con historial pecuario en el noreste de México. *Polibotánica*, (38), 53-66. doi: 10.21678/apuntes.77.740
- Moreno, J. A. (2008). *Sistemas y análisis de la información geográfica: manual de autoaprendizaje con ArcGIS*. (Segunda Edición). México: Alfaomega.
- Ortega-Gaucin, D. (2014). Sequía en México y Estados Unidos de América: diferencias esenciales de vulnerabilidad y enfoques en la atención al fenómeno. *Frontera norte*, 26(SPE3), 141-148.
- Pedroza S., A. (1995). *El déficit hídrico en las plantas. Principios y técnicas de manejo*. Bermejillo, Dgo.: Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas. Universidad Autónoma Chapingo.
- Pedroza S., A. (2010). *Desarrollo Comunitario Sustentable. Una alternativa a la crisis agroalimentaria en países en desarrollo*. Chapingo, México: Universidad Autónoma Chapingo.
- Pedroza S., A., Sánchez C., I., Becerra L., J. L., Ramos C., E., Reyes B., C., Rosales P., L. V. & Vargas P., G. (2014). Regionalización de zonas con escaso régimen pluvial: Estudio de caso zona Centro-Norte del estado de Durango, México. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 13(2), 71-85. doi: 10.5154/r.rchsza.2013.03.01
- Rzedowski, J., (2006). *Vegetación de México*. (1ra. ed. Digital). México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Sánchez C., I. (2005). *Fundamentos para el aprovechamiento integral del agua. Un enfoque de simulación de procesos*. Libro Científico. Gómez Palacio, Durango, México: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias, Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relaciones Agua Suelo Planta Atmosfera.

- Servicio Meteorológico Nacional (SMN). (2010). Normales climatológicas por Estado. Comisión Nacional del Agua. México D.F. Recuperado de http://smn1.conagua.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=42&Itemid=75
- Shope, C. L. & Maharjan, G. R. (2015). Modeling spatiotemporal precipitation: effects of density, interpolation, and land use distribution. *Advances in Meteorology*, 2015, 1-16. doi: 10.1155/2015/174196
- Stretta, E. J. & Mosiño, P. A. (1963). *Distribución de las zonas áridas de la república según un nuevo índice de aridez derivado del de Emberger*. Vol. 16. México: Ingeniería Hidráulica en México.
- Velasco, I. & Pimentel, E. (2010). Zonificación agroclimática de Papadakis aplicada al estado de Sinaloa, México. *Investigaciones geográficas*, (73), 85-102. doi: 10.14350/rig.23864
- Velasco-Molina, H. A. (1991). *Las zonas áridas y semiáridas: sus características y manejo*. México, D.F.: Limusa.
- Velázquez M., M., Hernández G., F. J., Cervantes B., J. F. & Gámez V., H. G. (2015). *Establecimiento de pastos nativos e introducidos en zonas áridas de México*. San Luis Potosí, SLP Méx.: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. CIR-Noreste.

CAPÍTULO III

ZONIFICACIÓN AGROCLIMÁTICA DE ÁREAS DE PASTIZAL COMO HERRAMIENTA DE APOYO EN LA RECONVERSIÓN PRODUCTIVA

RESUMEN

Para el estudio de zonificación agroclimática de especies de pastos, se requieren dos procesos: el primero es referido a la definición precisa de los requerimientos agroecológicos de la especie, y el segundo, el contraste de éstos con las condiciones que oferta el medio ambiente de un lugar específico. El objetivo de este trabajo fue determinar las áreas con mayor potencial productivo de pastos en la cuenca media Nazas-Aguanaval y estimar la superficie que representan. Para ello, se utilizó el procedimiento de zonificación agroecológica para áreas óptimas y subóptimas con la conjunción de requerimientos agroclimáticos de ocho especies de pastos con alta preferencia forrajera en la región. Se analizaron tres variables climáticas, cinco propiedades edafológicas y dos topográficas mediante cartografía digital. En particular, la variable precipitación se modeló al 70, 50 y 30 % de probabilidad. Se generaron mapas mediante álgebra booleana entre los requerimientos con el software ArcMap 10.1. El análisis de las variables climáticas, edáficas y topográficas, además de la posterior representación cartográfica en la cuenca, mostró que para las especies nativas existen áreas de hasta 38 % respecto a la superficie de la cuenca con potencial alto para su desarrollo; los pastos introducidos representaron las menores superficies aptas con menos del 9 % respecto a la superficie de la cuenca. Lo anterior permite ubicar zonas para realizar el establecimiento o reconversión del suelo con las especies identificadas.

Palabras Clave: Pasto introducido, pasto nativo, aptitud agroclimática, SIG.

AGROCLIMATIC ZONING OF GRASSLANDS AS A SUPPORT TOOL IN THE PRODUCTIVE RECONVERSION

ABSTRACT

For the study of agroclimatic zoning of grasses species, two processes are required: the first is referred to the precise definition of the agroecological requirements of the species, and the second, the contrast of these with the conditions offered by the environment of a specific place. The aim of this study was to determine the areas with the greatest productive potential of grasses in the Nazas-Aguanaval middle watershed and to estimate the surface they represent. In order to accomplish this objective, the agroecological zoning procedure was used for optimum and suboptimal areas with the combination of agroclimatic requirements of eight species of grasses with high forage preference in the region. Three climatic variables were analyzed, six edaphological properties and two topographic variables through digital cartography. In particular, the precipitation variable was modeled at 70, 50 and 30 % probability. Maps were generated through boolean of the requirements algebra among with ArcMap 10.1 software. The analysis of climatic, edaphic and topographic variables, in addition to the subsequent cartographic representation in the basin, showed that for native species there are areas of up to 38 % with respect to the surface of the basin with high potential for its development; the grasses introduced represented the smallest suitable surfaces with less than 9 % of the surface of the basin. This allows to locate zones to carry out the establishment or reconversion of the soil with the identified species.

Keywords: Introduced grass, native grass, agroclimatic aptitude, GIS.

INTRODUCCIÓN

Los estudios de zonificación agroecológica (ZAE), desempeñan un papel muy importante en la delimitación de áreas, en las cuales es posible definir qué especies tienen mayor potencial de producción (FAO, 1997). En el ámbito de la planificación agrícola, la ZAE es una de las principales herramientas empleadas para disminuir los riesgos a los que está sometida la agricultura y tiene como objetivo otorgar espacios geográficos atendiendo exigencias edafoclimáticas de las especies vegetales, que garantice el crecimiento, desarrollo y rendimiento de las mismas (Santos, 2017).

La FAO (1978) propone la metodología de ZAE, para definir zonas con alto potencial productivo, con base en combinaciones de suelo, fisiografía y características climáticas. Los parámetros usados en la definición se centran en los requerimientos climáticos, edáficos y manejo de las especies y cultivos.

Diversos estudios han utilizado la metodología ZAE para identificar potenciales productivos de diversos cultivos y especies con relevancia económica como el maíz (Ruíz-Vega, 1998), la caña de azúcar (Jiménez *et al.*, 2004), la yuca (Rivera-Hernández *et al.*, 2012), el café (Soto *et al.*, 2001) y diversas hortalizas (Villa *et al.*, 2001).

Particularmente, la cuenca media Nazas-Aguanaval es una amplia zona con tierras dedicadas al agostadero, ya que predominan condiciones edafoclimáticas favorables para la presencia de diferentes especies de pastos. Esta región es considerada como una zona semiárida con una precipitación media anual que oscila entre los 300 a 600 mm (Chávez-Ramírez *et al.*, 2011). Sin embargo, la cuenca presenta cierto grado de degradación en el ecosistema del pastizal, ya que se practica la ganadería extensiva, ocasionando sobrepastoreo, erosión y la condición de los pastizales es regular (CONAFOR-UACH, 2013).

La identificación a través de la zonificación agroecológica de sitios con aptitud productiva y aquellas especies que pueden progresar bajo estas condiciones,

permitiría ubicar donde realizar la reconversión del suelo y lograr que el cambio en el uso de éste, permita la recuperación paulatina del ecosistema del pastizal.

Para efectuar la zonificación agroecológica de cualquier planta, es necesario tener en cuenta los criterios que permitan determinar las zonas ecológicas basadas en los requerimientos de los mismos y en función de su desarrollo fisiológico y productivo (FAO, 1997; García & Sierra, 2010). Por ello, el potencial productivo es la delimitación geográfica espacial de las áreas o zonas donde es factible realizar con mayor probabilidad de éxito, la producción de diferentes especies agrícolas o pecuarias, con el menor deterioro al medio ambiente (Díaz *et al.*, 2012). El objetivo del trabajo fue identificar y representar cartográficamente las áreas con potencial productivo y aptitud ecológica para el desarrollo de especies de pastos con mayor capacidad forrajera con el fin de evaluar su futura reconversión en suelos degradados de la cuenca media Nazas-Aguanaval.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación geográfica del área de estudio

Este trabajo se realizó en la parte media de la cuenca de los ríos Nazas y Aguanaval. Ambos ríos corresponden a la principal fuente de agua de la región hidrológica 36, ubicada en el norte centro de México, entre los meridianos 23° y 27° de latitud norte y los paralelos 106° y 102° de longitud oeste (Quintanal, 2011).

Selección y requerimientos bioclimáticos de los pastos

Se utilizó la metodología de ZAE propuesta por la FAO (1997), para zonas óptimas y subóptimas de especies vegetales. La determinación del potencial productivo de los tipos de pastos, se realizó considerando las especies con preferencia forrajera más alta (Sánchez-Ken *et al.*, 2012) y con presencia en la cuenca media (Herrera, 2001). Por ello, se seleccionaron cuatro especies nativas y cuatro introducidas a la región.

Los pastos nativos seleccionados para el estudio fueron zacate navajita (*Bouteloua gracilis* H.B.K [Lag.], banderita (*Bouteloua curtipendula* [Michx.] Torr.), pajita tempranero (*Setaria macrostachya* Kunth) y zacate lobero (*Lycurus phleoides* Kunth). Los pastos introducidos fueron el zacate Buffel (*Pennisetum ciliare* L.), Rhodes (*Chloris gayana* Kunth), bermuda (*Cynodon dactylon* L.) y estrella africana (*Cynodon plectostachyus* K. Schum.).

Se realizó una conjunción de los requerimientos agroecológicos de las ocho especies de pastos mediante una consulta de los factores que intervienen en su crecimiento y desarrollo, en fuentes bibliográficas (Sánchez-Ken *et al.*, 2012; Herrera & Pámanes, 2010; Herrera, 2001), con el fin de identificar las necesidades de temperatura media anual, precipitación anual, altitud, tipo, clase textural, profundidad y conductividad eléctrica del suelo. Lo anterior proporcionó una plataforma que permitió identificar desde áreas con potencial productivo no apto, medio y alto, en donde este último satisface totalmente las necesidades de los pastos para su desarrollo (Cuadro 5).

Cuadro 5. Requerimientos de altitud, precipitación, temperaturas y características edáficas óptimas para los pastos nativos e introducidos.

Especie	Altitud (msnm)	Precipitación (mm)	Temperatura media anual °C	Textura, CE mmhos cm⁻¹ y Pendiente (%)
<i>B. gracilis</i>	2000-2500	350-650	11-19	Media, 0-4, 0-8
<i>B. curtipendula</i>	1700-2500	350-650	11-19	Media, 0-4, 0-8
<i>S. macrostachya</i>	1250-1900	400-600	15-20	Media, 0-4, 0-10
<i>L. phleoides</i>	1890-2600	350-600	12-18	Media, 0-4, 0-10
<i>P. ciliare</i>	0-1800	410-750	18-27	Media-Fina, 0-4, 0-8
<i>C. gayana</i>	1000-1800	512-1000	18-25	Media, 0-4, 0-8
<i>C. dactylon</i>	0-1800	≥500	≥17.5	Media-Fina, 0-8, 0-8
<i>C. plectostachyus</i>	0-2000	≥550	16-27	Media, 0-4, 0-8

Fuente: Sánchez-Ken *et al.*, 2012; Herrera & Pámanes, 2010; Herrera, 2001.

Criterio edafológico

La siguiente etapa del procedimiento de zonificación agroecológica, consistió en la evaluación del recurso suelo. En el presente estudio se utilizó la información reportada por INEGI (2018), en mapas digitales escala 1: 250,000, donde se utilizaron variables incluidas en las Unidades de suelo como tipo de suelo, conductividad eléctrica y textura. Las propiedades de cada una de las Unidades de los suelos, se compararon con las propiedades del mismo que requieren los pastos.

Criterio climático

Se generaron bases de datos con los promedios de las variables climáticas de 26 estaciones meteorológicas selectas, considerando las variables del Cuadro 5. Las bases de datos se almacenaron en el SIG, en el cual se construyeron los mapas de isolíneas de temperatura y precipitación a escala 1: 250,000. La interpolación para el cálculo de isolíneas fue realizada con el método del promedio del Inverso de Cuadrado de las Distancias o IDW, incluido dentro del programa SIG ArcMap 10.1 (ESRI, Redlands, CA, USA). Para conocer la dependencia geográfica que existe entre los valores interpolados se realizó un análisis geo-estadístico dentro del SIG, el método IDW realizó una predicción aceptable en los niveles espaciales de cada estación climática para la zona de interés, ya que sus indicadores en la validación como el Mean Error (≤ 0.01) y el RMS (0.03) fueron considerablemente inferiores en comparación con los otros métodos que se evaluaron en la etapa de selección de modelos de interpolación.

Criterio topográfico

Se utilizó el modelo de elevación digital de la región (MDE), descargado del INEGI (2018), escala 1: 250,000. El MDE con resolución en píxeles de 100 metros, describe la altimetría de una zona mediante un conjunto de datos acotados. Siguiendo la analogía cartográfica, con reclasificación y conversión de mapas ráster a vectorial, se construyó un conjunto de mapas temáticos de altitudes y

pendientes, elaborados a partir de la información contenida implícitamente en el MDE.

Estimación y delimitación de zonas potenciales

Posteriormente, con el álgebra booleana con el operador lógico And, se obtuvieron zonas con alto potencial climático y edafológico, mediante el proceso de intersección de imágenes de los requerimientos y la superficie que representan en hectáreas, dando origen a los mapas con alto y medio potencial agroclimático para los ocho pastos analizados. Para estos procesos se utilizó un SIG con el software ArcMap 10.1 (ESRI, Redlands, CA, USA).

Zonas potenciales a diferentes probabilidades de lluvia

Para realizar la estimación de potenciales productivos de acuerdo a la ocurrencia de lluvia, la variable precipitación anual de las 26 estaciones usadas, se modeló en mapas al 70, 50 y 30 % de probabilidad de acuerdo a la distribución gamma. Los mapas fueron intersectados bajo los mismos requerimientos agroclimáticos antes citados para los ocho pastos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Superficies potenciales para los pastos

De acuerdo a los mapas climáticos, la cuenca media Nazas-Aguanaval dispone de temperatura y precipitación favorable para el buen desarrollo y crecimiento de los ocho pastos analizados. La precipitación promedio anual de entre 294.6 y 556.5 mm de la cuenca, contribuyen a la distribución potencial de los zacates. Las temperaturas promedio anual fluctúan entre 14.9 a 20.6 °C, las cuales están en el rango de temperatura deseable. Sin embargo, la variable precipitación, restringe la expansión espacial para algunas especies introducidas.

La cuenca media Nazas-Aguanaval tiene una superficie estimada de 33,304.6 km², de esta, se obtuvieron altos porcentajes de áreas con potencial productivo óptimo y medio para los cuatro pastos nativos y cuatro introducidos (Cuadro 6).

Cuadro 6. Superficies potenciales en la cuenca media de los ocho pastos.

Especie	Nombre científico	Característica	Superficie con potencial alto (ha)	Superficie con potencial medio (ha)
Navajita	<i>B. gracilis</i>	Nativo	1,003,711.3	465,150.7
Banderita	<i>B. curtipendula</i>	Nativo	1,267,765.8	777,872.1
Pajita temprano	<i>S. macrostachya</i>	Nativo	808,141.5	867,349.9
Lobero	<i>L. phleoides</i>	Nativo	522,463.4	459,284.7
Buffel	<i>P. ciliare</i>	Introducido	305,412.1	1,241,097.3
Rhodes	<i>C. gayana</i>	Introducido	37,178.2	965,267.8
Bermuda	<i>C. dactylon</i>	Introducido	73,201.3	752,853.2
Estrella africana	<i>C. plectostachyus</i>	Introducido	42,463.8	331,895.1

Distribución espacial de los pastos nativos

La distribución potencial de las cuatro especies nativas, es superior en los rangos óptimos y medios respecto a las especies introducidas. En relación a los pastos del género *Bouteloua*, tanto el zacate navajita como banderita, obtuvieron la mayor superficie de distribución potencial en la cuenca media (Figura 8).

Debido a la amplia diversidad cosmopolita del género *Bouteloua* (Velázquez *et al.*, 2015), la cuenca media, al contar con variedad de climas por altitud sobre el nivel del mar y tipo de suelo, hace que haya alta adaptabilidad de estas especies a la región. En particular, el pasto navajita por su versatilidad ecológica es considerado el pasto más promisorio para la revegetación de los pastizales semiáridos (Moreno-Gómez *et al.*, 2012). Igualmente, el zacate banderita es la especie nativa más utilizada en programas de resiembra de pastizales en el norte de México, ya que se adapta a una amplia gama de eco-regiones (Morales-Nieto *et al.*, 2016).

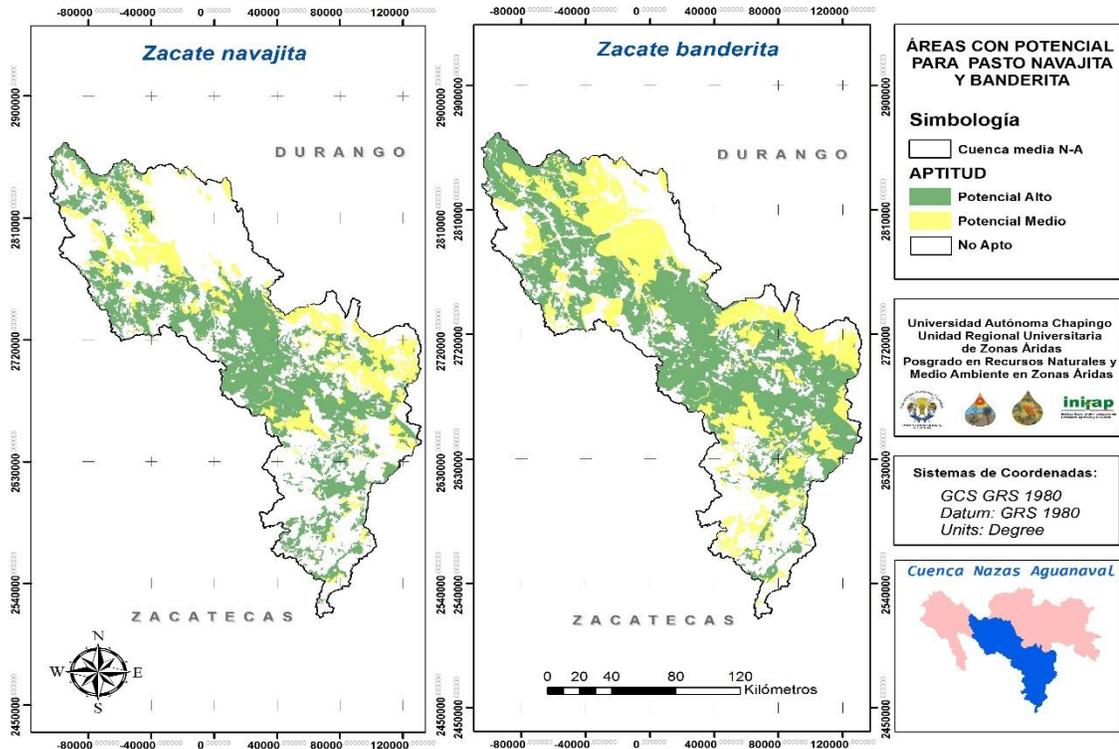


Figura 8. Áreas con potencial productivo para *B. gracilis* (izquierda) y *B. curtipendula* (derecha) en la cuenca media Nazas-Aguanaval.

Respecto a la especie *S. macrostachya*, está ampliamente reportada para diversos tipos de climas del norte de México (Melgoza *et al.*, 2008), por ello la distribución espacial de estas zonas, muestra la alta variabilidad y adaptación de este pasto a los tipos de suelo y clima predominantes en la cuenca media Nazas-Aguanaval. También, *L. phleoides* es reportada como una especie con alta adaptabilidad a los pastizales de la zona norte del país, con ciertas restricciones al déficit hídrico (Cantú, 2011). Estas especies presentaron áreas excluyentes al norte y este de la cuenca media, correspondientes a la transición con la cuenca baja (Figura 9).

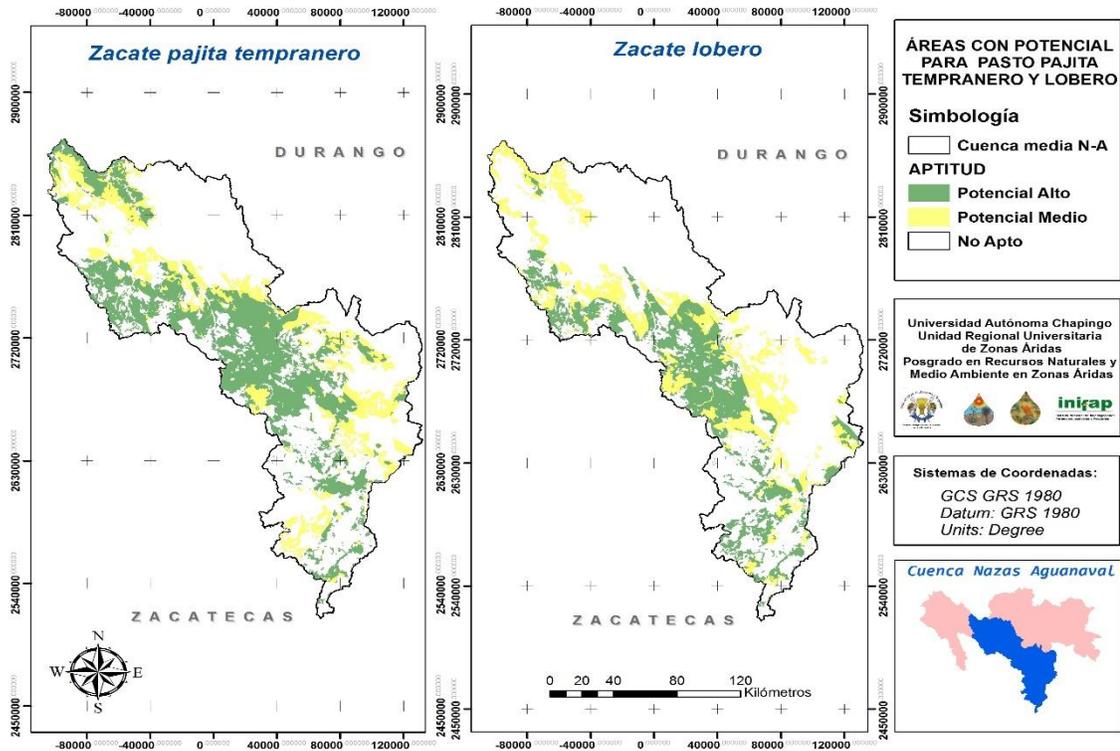


Figura 9. Áreas con potencial productivo para *S. macrostachya* (izquierda) y *L. phleoides* (derecha) en la cuenca media Nazas-Aguanaval.

Distribución espacial de los pastos introducidos

En referencia a los pastos introducidos, en los zacates Buffel y Rhodes, la distribución espacial en potenciales óptimos es inferior, principalmente por la limitación de la variable precipitación anual (Figura 10). Para el pasto Buffel, Ibarra-Flores *et al.* (1999), señala que en México, las regiones donde esta especie persiste y coloniza áreas vecinas no sembradas, presenta una precipitación en verano 250 a 550 mm, valores superiores a la precipitación media anual en la cuenca; bajo otras condiciones, su adaptación y persistencia se reducen y generalmente no se dispersa o muere.

En cuanto al zacate Rhodes, es una especie introducida que es ampliamente reconocido por su resistencia a la sequía, sin embargo, crece en sitios con precipitaciones anuales desde 600 a 1,000 mm y con fríos moderados (Quero-Carrillo *et al.*, 2013), ambas variables, son determinantes para su éxito, la primera

por los requerimientos hídricos, y la segunda por la sensibilidad a las heladas, condiciones que se presentan en algunas áreas de la cuenca de este estudio.

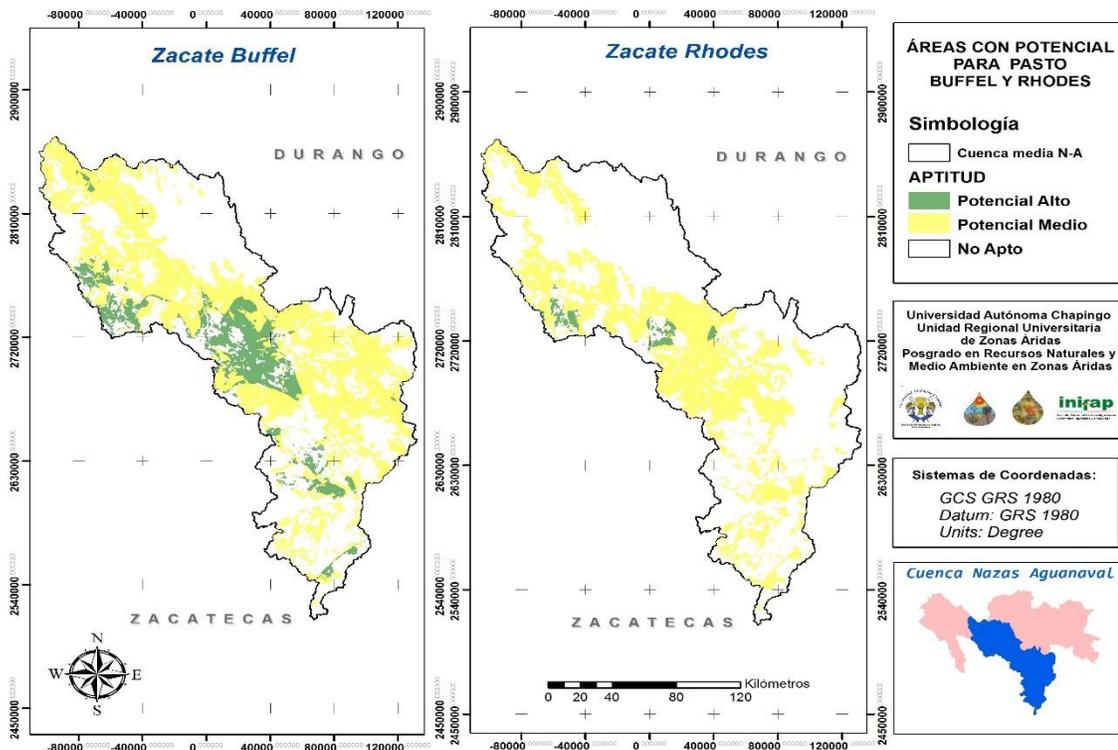


Figura 10. Áreas con potencial productivo para *P. ciliare* (izquierda) y *C. gayana* (derecha) en la cuenca media Nazas-Aguanaval.

Los pastos *C. dactylon* y *C. plectostachyus* representaron la menor superficie espacial en la cuenca media (Figura 11). Ambos zacates introducidos requieren altos volúmenes de precipitación para su crecimiento y desarrollo adecuados, variable limitada en la mayor parte de la cuenca. Quero-Carrillo & Manzano-Camarillo (2013), señalan que el zacate bermuda es uno de los pastos más cosmopolitas en México. Se desarrolla vigorosamente en sitios de 500 a 1300 mm de precipitación media anual, dada su producción de estolones como rizomas, con rápida capacidad de colonización, sin embargo, entra en dormancia por bajas temperaturas y sequía.

A pesar de que *C. plectostachyus* es un pasto que crece en una amplia gama de suelos, además es calificado como resistente a la sequía y ampliamente adaptado al trópico seco y húmedo, su precipitación óptima es cercana a los 800

mm (Enríquez *et al.*, 2011). Esta condición lo hace poco favorable en el establecimiento en áreas de la cuenca.

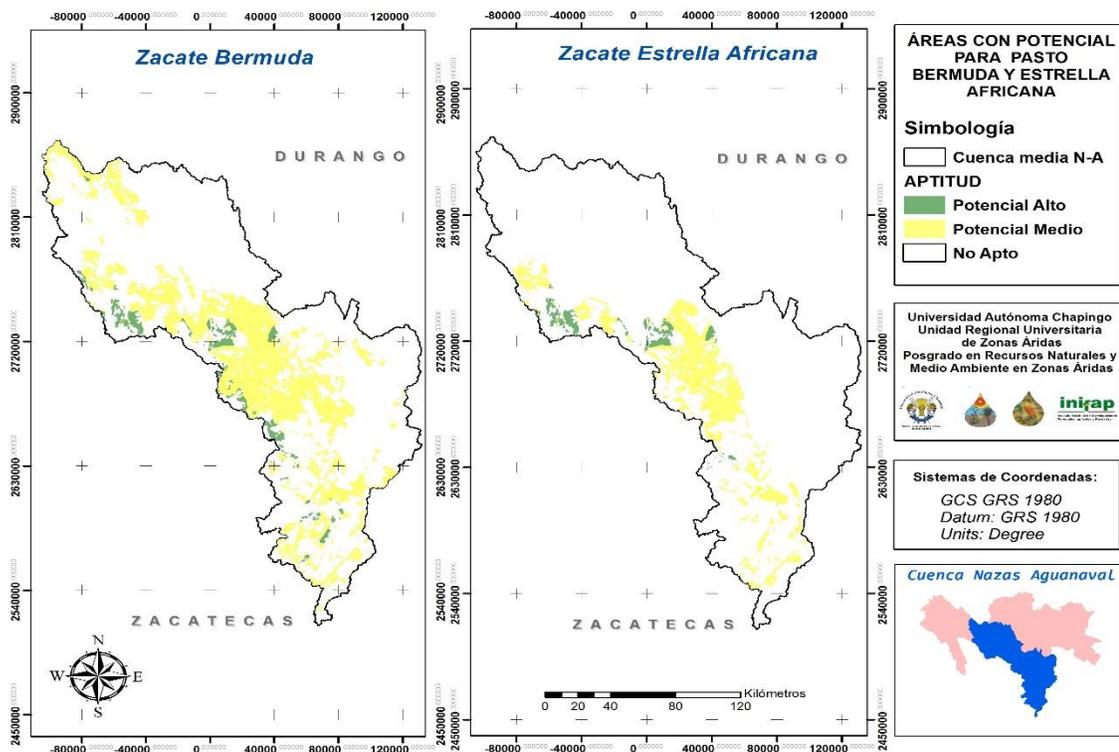


Figura 11. Áreas con potencial productivo para *C. dactylon* (izquierda) y *C. plectostachyus* (derecha) en la cuenca media Nazas-Aguanaval.

Porcentaje relativo de superficie óptima y subóptima

En relación al porcentaje relativo de la superficie óptima y subóptima de los ocho pastos respecto al total de la cuenca, el Cuadro 7, reporta que los pastos nativos constituyeron altos porcentajes para el potencial alto, destacando los del género *Bouteloua*, con 30.14 y 38.07 % para navajita y banderita, respectivamente.

Los pastos pajita temprano (24.27 %) y lobo (15.69 %), representan opciones alternativas a los pastos *Bouteloua* en programas de resiembra de pastizales. De los zacates introducidos, únicamente el Buffel presentó altos porcentajes para el potencial medio (37.27 %). El resto de los pastos introducidos, obtuvieron porcentajes inferiores al 3 %.

Cuadro 7. Porcentajes relativos para los potenciales altos y medios con respecto al total de la cuenca media Nazas-Aguanaval.

Especie	% PA con respecto a la superficie de la cuenca	% PM con respecto a la superficie de la cuenca
<i>B. gracilis</i>	30.14	13.97
<i>B. curtispindula</i>	38.07	23.36
<i>S. macrostachya</i>	24.27	26.04
<i>L. phleoides</i>	15.69	13.79
<i>P. ciliare</i>	9.17	37.27
<i>C. gayana</i>	1.12	28.98
<i>C. dactylon</i>	2.20	22.61
<i>C. plectostachyus</i>	1.28	9.97

PA=Porcentaje alto; PM=Porcentaje medio

En algunos casos, la distribución espacial de las áreas potenciales descrita a través de mapas por especie, corresponde a áreas comunes que pueden ser óptimas para más de una gramínea, por lo que la decisión del pasto por establecer, estará en función de criterios económicos y disponibilidad de semilla.

Los resultados obtenidos tienen algunas consideraciones referidas por Medina *et al.*, (2001), las cuales señala que, utilizando obras de captación o conservación de humedad, puede hacer que una zona con potencial moderado se convierta a potencial alto, además las zonas potenciales que se obtuvieron no son excluyentes, es decir, una misma área puede tener potencial para varias especies y para que éstas expresen su máximo potencial, se debe aplicar la tecnología de producción.

De acuerdo a las áreas potenciales, la selección de especies nativas, muestran extensas áreas de adaptabilidad, sin embargo, algunas especies introducidas son igual o más productivas y pueden adaptarse perfectamente en áreas de potencial moderado como lo es el pasto Buffel (Jurado *et al.*, 1990; Velásquez *et al.*, 2014).

La amplia distribución ecológica de la zona, sugiere una alta variabilidad y potencial de adaptación en la mayoría de los pastos nativos y algunos introducidos a los tipos de suelo y clima predominantes en la cuenca media Nazas-Aguanaval. Por ello, la selección de especies como las descritas en el estudio con alto potencial forrajero, son factibles de utilizar en programas de resiembra de pastizales con fines de rehabilitación o producción.

La promoción de siembra de pastos nativos e introducidos como el Buffel, representa una perspectiva para la recuperación de agostaderos degradados, ya que muestran alta adaptación a la zona de estudio; además de su alto potencial forrajero (Sánchez-Ken *et al.*, 2012; Velásquez *et al.*, 2014), lo cual representan una opción en las regiones con características áridas y semiáridas.

Sin embargo, es necesario considerar algunas restricciones normativas para especies introducidas en México, ya que, algunos pastos, están sujetos a regulaciones, de acuerdo a lo establecido en la legislación vigente de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (DOF, 2016). Al respecto, Koleff *et al.* (2010), señalan que algunas especies introducidas pueden causar desequilibrios ecológicos que pueden desplazar poblaciones de especies de la vida silvestre o reducir la diversidad genética de especies nativas.

Otros autores señalan que para realizar restauraciones ecológicas, tales como la rehabilitación, para mejorar o recuperar zonas perturbadas, requiere conocimientos tanto de las condiciones fisicoquímicas de la zona afectada, como de la fisiología de las especies que puedan sobrevivir en condiciones degradadas y mejorarlas. Igualmente, las especies no nativas que pueden ayudar a recuperar un ecosistema degradado, deben tener características similares de forma y requerimientos ambientales que correspondan a las condiciones que se presentan en la zona a restaurar (Segura, 2005).

Zonas potenciales involucrando ocurrencia de precipitación

Las áreas potenciales como resultado de la sobreposición de imágenes correspondientes a los requerimientos edafoclimáticos de los pastos,

combinando únicamente la restricción de la variable precipitación a distintos niveles de probabilidad de lluvia, se presentan en el Cuadro 8.

Los resultados muestran que las modificaciones de esta variable climática, propuesta por diferentes niveles de ocurrencia utilizados en este estudio, podrían tener efectos en la distribución de las ocho especies de pastos.

Cuadro 8. Superficies potenciales de los pastos involucrando ocurrencia de precipitación a diferentes probabilidades.

Especie	Superficie (ha) al 30 %	Superficie (ha) al 50 %	Superficie (ha) al 70 %
<i>B. gracilis</i>	959,548.00	1,003,711.3	1,022,781.81
<i>B. curtipendula</i>	1,217,055.17	1,267,765.8	1,296,924.41
<i>S. macrostachya</i>	764,905.93	808,141.5	828,345.04
<i>L. phleoides</i>	512,014.13	522,463.4	538,921.00
<i>P. ciliare</i>	282,506.19	305,412.1	309,077.05
<i>C. gayana</i>	32,716.82	37,178.2	37,921.76
<i>C. dactylon</i>	64,856.35	73,201.3	74,006.51
<i>C. plectostachyus</i>	37,554.98	42,463.8	42,888.43

Particularmente, las especies nativas fueron las menos afectadas para la probabilidad de lluvia al 30 %. El decremento en superficie de la probabilidad del 70 al 30 % fue de 6.2 % para los pastos del género *Bouteloua*, 5.0 % para *L. phleoides* y *S. macrostachya* con 7.7 %. Al respecto, los zacates nativos están adaptados a periodos cortos y largos de sequía, además de estar en crecimiento activo, pueden soportar la sequía en el verano, sin embargo, reducen su productividad (Pinedo *et al.*, 2013).

No obstante, las especies introducidas cuyos intervalos de precipitación anual son más demandantes, la modelación al 30 % de probabilidad, fue notable la reducción de hectáreas potenciales; bajo este escenario las condiciones no serán adecuadas para el establecimiento y permanencia de estas especies. *C. gayana* reportó el mayor decremento en superficie, con 13.7 % respecto al 70 % de

probabilidad de lluvia; los pastos del género *Cynodon* registraron un 12.4 %. *P. ciliare* reportó una tasa de decremento en superficie del 8.6 %.

El establecimiento y propagación de las gramíneas forrajeras en condiciones de déficit hídrico disminuye significativamente (Ruíz-Álvarez *et al.*, 2011). Otros autores señalan que las especies no nativas pueden beneficiarse al cambio en los patrones de precipitación, a expensas de los nativos. Por efecto del cambio climático, la precipitación podría cambiar a períodos de tiempo cuando las especies nativas crecen menos, y esta fluctuación en los recursos disponibles puede beneficiar a las especies introducidas (Davis *et al.*, 2000).

CONCLUSIONES

La zonificación agroclimática, permite la toma de decisiones sobre la factibilidad de realizar una reconversión del suelo y lograr que este cambio, permita la recuperación progresiva de los pastizales, o bien, reubicar especies en áreas donde los pastos no satisfacen sus requerimientos ambientales óptimos para expresar su máximo potencial de producción.

Los pastos nativos reportaron la mayor cantidad de superficie con aptitud alta, respecto al total de la cuenca, destacando al pasto banderita con el 38 %, al representar más del 1, 267, 765 ha; el pasto navajita con el 30.1 % (1, 003,711 ha) y; pasto temprano y lobo con 24.3 % (808,141 ha) y 15.7 % (522,463 ha), respectivamente.

La distribución espacial para el potencial alto en pastos introducidos fue menor con superficies inferiores al 9 %, respecto al total de la cuenca. Únicamente, el pasto Buffel destacó sobre el resto con 1, 241,097 ha, para el potencial medio.

Las modificaciones en la ocurrencia de la precipitación, tuvieron efectos en la distribución de las ocho especies de pastos; principalmente, en la probabilidad de ocurrencia de lluvia al 30 %, las especies introducidas son mayormente afectadas.

LITERATURA CITADA

- Cantú B., J. E. (2011). *Manejo y mejoramiento de pastizales*. Chihuahua, Chih. México: Doble Hélice Ediciones.
- Chávez-Ramírez, E., González-Cervantes, G., González-Barrios, J. L. & López D., A. (2011). La evapotranspiración en la cuenca baja media del río Nazas. En Oswald S., U. (Coord.). *Retos de la Investigación del Agua en México* (121-129). Cuernavaca, México: Centro Regional de Investigaciones Multidisciplinarias, Universidad Nacional Autónoma de México/Scientific Network on Water–National Council on Science and Technology.
- CONAFOR-UACH. (2013). *Línea base nacional de degradación de tierras y desertificación. Informe final*. Zapopan, Jalisco: Comisión Nacional Forestal y Universidad Autónoma Chapingo.
- Davis, M. A., Grime, J. P. & Thompson, K. (2000). Fluctuating resources in plant communities: a general theory of invasibility. *Journal of Ecology*, 88(3), 528-534. doi: 10.1046/j.1365-2745.2000.00473.x
- Diario Oficial de la Federación (DOF). 2016. ACUERDO por el que se determina la Lista de las Especies Exóticas Invasoras para México. Recuperado de https://www.biodiversidad.gob.mx/especies/Invasoras/pdf/Acuerdo_especies_exoticas_SEMARNAT.pdf
- Díaz P., G., Guajardo P., R. A., Medina G., G., Sánchez C., I., Soria R., J., Vázquez A., M. P., Quijano C., J. A., Legorreta P., F. & Ariel R., C. J. (2012). *Potencial productivo de especies agrícolas de importancia socioeconómica en México*. Publicación especial, (8). México: INIFAP.
- Enríquez Q., J. F., Meléndez N., F., Bolaños E. & Esqueda V., A. (2011). *Producción y manejo de forrajes tropicales*. Libro Técnico Núm. 28. Veracruz, México: INIFAP. Centro de Investigación Regional Golfo Centro. Campo Experimental La Posta.

- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). (1978). *Report on the agroecological Zones Project. Methodology and Results for Africa*. Rome, Italy: World Soil Resources Report 40. FAO.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). (1997). *Zonificación agro-ecológica. Guía general*. Boletín de suelos, núm. 73, Roma, Italia: Servicio de Recursos, Manejo y Conservación de Suelos, Dirección de Fomento de Tierras y Aguas,
- García C., Y. & Sierra V., A. E. (2010). *Manual de zonificación ecológica de especies forestales y aplicación de modelos de simulación del efecto de cambio climático*. México: CONAFOR.
- Herrera A., Y. (2001). *Las gramíneas de Durango*. Durango. Méx.: Instituto Politécnico Nacional, CONABIO.
- Herrera A., Y. & Pámanes G., S. (2010). *Guía de Pastos de Zacatecas*. México, D.F.: Instituto Politécnico Nacional, CONABIO.
- Ibarra-Flores, F., Cox, J. R., Martin-Rivera, M., Crowl, T. A., Norton, B. E., Banner R. E. & Miller, R. W. (1999). Soil physicochemical changes following Buffelgrass establishment in Mexico. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 13(1), 39-52. doi: 10.1080/089030699263474
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía, e Informática). (2018). Descarga de cartografía digital de los temas relieve continental, modelos digitales de elevación y edafología serie II de la República Mexicana. Recuperado de <https://www.inegi.org.mx/temas/mapas/mg/>
- Jiménez, C. A., Vargas, T. V., Salina, C. W. E., Aguirre, B. M. de J. & Rodríguez, C. D. (2004). Aptitud agroecológica para el cultivo de la caña de azúcar en el sur de Tamaulipas, México. *Investigaciones geográficas*, 53, 58-74. doi: 10.14350/rig.30203
- Jurado G., P., Negrete R., L. F., Arredondo M., J. T. & García H., M. R. (1990). Evaluación de especies forrajeras nativas e introducidas bajo condiciones

del altiplano central mexicano. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 28(1), 40-44.

Koleff, P., González, A. I. & Born-Schmidt, G. (2010). *Comité Asesor Nacional sobre Especies Invasoras. Estrategia nacional sobre especies invasoras en México, prevención, control y erradicación*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Comisión Nacional de Áreas Protegidas. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Medina G., G., Salinas G., H. & Rubio A., F. (2001). *Potencial productivo de especies forrajeras en el estado de Zacatecas*. Libro técnico (1). Zacatecas, Zac: Campo Experimental Zacatecas. CIRNOC. INIFAP

Melgoza, A., Morales, C. R., Sierra, J. S., Royo, M. H., Quintana, G. & Lebgue, T. (2008). *Manual práctico para la identificación de las principales plantas en los agostaderos de Chihuahua*. (2ª edición). Chihuahua, Méx.: Unión Ganadera Regional de Chihuahua-Fundación PRODUCE.

Morales-Nieto, C. R., Avendaño-Arrazate, C., Melgoza-Castillo, A., Vega, G., del Carmen, K., Quero-Carrillo, A., Jurado-Guerra, P. & Martínez-Salvador, M. (2016). Caracterización morfológica y molecular de poblaciones de pasto banderita (*Bouteloua curtipendula*) en Chihuahua, México. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 7(4), 455-469. doi: 10.22319/rmcp.v7i4.4283

Moreno-Gómez, B., García-Moya, E., Rascón-Cruz, Q. & Aguado-Santacruz, G. A. (2012). Crecimiento y establecimiento de plántulas de *Bouteloua gracilis* (Kunth) Lag. ex Griffiths y *Eragrostis curvula* var. *conferta* Stapf bajo un régimen simulado de lluvia. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 35(4), 299-308.

Pinedo, A.C., Hernández Q., N. S., Melgoza, C. A, Rentería, V. M., Vélez S., V. C., Morales, N. C., Santellano, E. E. & Esparza, E. (2013). *Diagnóstico Actual y Sustentabilidad de los Pastizales del estado de Chihuahua ante el Cambio Climático*. Cuerpo Académico de Recursos Naturales y Ecología (UACH-CA16). Chihuahua, Méx.: Facultad de Zootecnia y Ecología, Universidad Autónoma de Chihuahua.

- Quero-Carrillo, A. R. & Manzano-Camarillo, M. (2013). Pasto Bermuda *Cynodon dactylon* (L.) Pers. En Quero-Carrillo, A. R. (Ed.). *Gramíneas Introducidas: Importancia e impacto en ecosistemas ganaderos* (103-116). Montecillo, Texcoco, Estado de México: Biblioteca Básica de Agricultura. COLPOS. doi: 10.13140/2.1.1312.8002
- Quero-Carrillo, A. R. Miranda, L. & Hernández G. A. (2013). Pasto Rhodes *Chloris gayana* Kunth. En Quero-Carrillo, A.R. (Ed.). *Gramíneas Introducidas: Importancia e impacto en ecosistemas ganaderos* (159-167). Montecillo, Texcoco, Estado de México: Biblioteca Básica de Agricultura. COLPOS. doi: 10.13140/2.1.1312.8002
- Quintanal, H. S. (2011). *El Río Nazas: la historia de un patrimonio lagunero*. México: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Investigaciones Antropológicas.
- Rivera-Hernández, B., Aceves-Navarro, L. A., Juárez-López, J., Palma-López, D. J., González-Mancillas, R. & González-Jiménez, V. (2012). Zonificación agroecológica y estimación del rendimiento potencial del cultivo de la yuca (*Manihot esculenta* Crantz) en el estado de Tabasco, México. *Avances en investigación agropecuaria*, 16(1), 29-47.
- Ruíz-Álvarez, O., Arteaga-Ramírez, R., Vázquez-Peña, M. A., López-López, R. & Ontivetos-Capurata, R. E. (2011). Requerimiento de riego y predicción del rendimiento en gramíneas forrajeras mediante un modelo de simulación en Tabasco, México. *Agrociencia*, 45(7), 745-760.
- Ruíz-Vega, J. (1998). Zonificación agroecológica del maíz de temporal en los valles centrales de Oaxaca. I. Determinación del potencial productivo. *Terra Latinoamericana*, 16(3), 269-275.
- Sánchez-Ken, J. G., Zita P., G. A. & Mendoza, C. M. (2012). *Catálogo de las gramíneas, malezas nativas e introducidas de México*. México: CONACOFI.

- Santos L., D. P. (2017). Elaboración de un SIG orientado a la zonificación agroecológica de los cultivos. *Revista Ingeniería Agrícola*, 4(3), 28-32.
- Segura B., S. G. (2005). *Las especies introducidas, ¿son benéficas o dañinas?*. Temas sobre restauración Ecológica. Diplomado en restauración ecológica, INE-SEMARNAT, México, 127-133.
- Soto, F., Vantour, A., Hernández, A., Planas, A., Figueroa, A., Fuentes, P. O., Tejeda, T., Morales, M., Vazquez, R., Zamora, E., Alfonso, H.M., Vazquez L. & Caro, P. (2001). La zonificación agroecológica del *Coffea arabica* L. en Cuba. Macizo montañoso Sagua-Nipe-Baracoa. *Cultivos Tropicales*, 22(3), 27-51. doi: 10.1234/ct.v22i3.683
- Velásquez, V., M. A., Muñoz V., J. A., Macías H., R., Esquivel A., G. & Rivera G., M. (2014). Producción de forraje de variedades de zacate buffel [*Pennisetum ciliare* L. (Link.) Sin. *Cenchrus ciliaris* L.] en la región árida del Estado de Durango, México. *AGROFAZ*, 14(1), 69-76.
- Velázquez M., M., Hernández G., F. J., Cervantes B., J. F. & Gámez V., H. G. (2015). *Establecimiento de pastos nativos e introducidos en zonas áridas de México*. San Luis Potosí, S.L.P. Méx.: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. CIR-Noreste.
- Villa C, M. M., Inzunza I., M. A. & Catalán V., E. A. (2001). Zonificación agroecológica de hortalizas involucrando grados de riesgo. *Terra Latinoamericana*, 19(1), 1-7.

CAPÍTULO IV

USO DE RETENEDORES DE HUMEDAD DEL SUELO EN LA SOBREVIVENCIA Y CRECIMIENTO DE *Bouteloua curtipendula* [Michx.] Torr. Y *Chloris gayana* Kunth EN ÁREAS DEGRADADAS DE PASTIZAL

RESUMEN

El 85 % de las zonas áridas y semiáridas de México presentan problemas de erosión por sobrepastoreo en áreas de pastizal, con el consecuente incremento en el proceso de desertificación de los suelos. El objetivo del presente estudio, fue evaluar diferentes especies y prácticas de retención de humedad en el suelo en el establecimiento y desarrollo de pasto en zonas semiáridas. Se usó un diseño experimental de bloques al azar en un arreglo de parcelas divididas con tres repeticiones. Las parcelas grandes correspondieron a las dosis de rastrojo de maíz (0 y 10 t ha⁻¹), las parcelas medianas a las dosis de hidrogel (0, 10 y 20 kg ha⁻¹) y las parcelas chicas a las dos especies de pastos *Bouteloua curtipendula* [Michx.] Torr. y *Chloris gayana* Kunth. Se usó el método de trasplante. El porcentaje de sobrevivencia fue superior a 72 % en promedio general, pero por especie el pasto *B. curtipendula* fue sobresaliente en las diferentes fechas de evaluación. El rastrojo de maíz como cobertura vegetal, registró un contenido de humedad en el suelo superior en 16.9 % en relación al testigo, con el consecuente incremento del 24.9 % en la producción de biomasa en términos de materia seca. Lo anterior se asoció a plantas con mayor altura, un mayor número de macollos y un mayor contenido de clorofila. El hidrogel, solo influyó durante los primeros 15 días después del trasplante (inicio de elongación), con un mejor porcentaje de sobrevivencia después del trasplante de los pastos; sin ningún efecto en fechas posteriores durante la fase de crecimiento y desarrollo.

Palabras clave: Cobertura vegetal, Rastrojo de maíz, Hidrogel, Forraje, Pastizal.

Tesis de Doctorado en Ciencias, Posgrado en Recursos Naturales y Medio Ambiente en Zonas Áridas, Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas, Universidad Autónoma Chapingo
Autor: Luis Gerardo Yáñez Chávez
Director de Tesis: Aurelio Pedroza Sandoval

**USE OF SOIL MOISTURE RETAINERS ON THE SURVIVAL AND GROWING
OF TWO GRASS SPECIES *Bouteloua curtipendula* [Michx.] Torr. AND
Chloris gayana Kunth IN DEGRADED GRASSLAND**

ABSTRACT

The 85 % of the arid and semiarid zones of Mexico have erosion problems due to overgrazing in livestock farms, with the consequent increase in the degradation of the soil. The objective of the study was to evaluate different species and soil moisture retention practices in the survival and development of grass in semiarid lands. A random experimental block design was used in a split-split plots arrangement with three replications. The large plots had the doses of stubble of corn (0 and 10 t ha⁻¹), medium plots at hydrogel doses (0, 10 and 20 kg ha⁻¹) and small plots the two species of grass *Bouteloua curtipendula* [Michx.] Torr, and *Chloris gayana* Kunth. The transplanting method was used. The survival percentage was greater than 72 % from general average; but this variable was outstanding in the *C. curtipendula* during different evaluation dates. The corn stubble as vegetal coverage increased the soil moisture content in 16.9 % in relation to the control, it as consequent increase of 24.9 % in biomass production in terms of dry matter. This was associated with plants with higher height, and higher number of tillers and higher chlorophyll content. The hydrogel in any doses used, only influenced the better of survival percentage of the grasses and the first 15 days after transplanting, when started the elongation step, but not in their growing and development.

Key words: Vegetal coverage, Dry corn stubble, Hydrogel, Forage, Grassland.

INTRODUCCIÓN

Las características más recurrentes en los pastizales de las zonas áridas y semiáridas son las sequías cíclicas y la alta presión del uso del suelo por el sobrepastoreo (Velásquez *et al.*, 2012). Los sistemas poco productivos en las regiones áridas y semiáridas con escasa cobertura vegetal en el suelo y bajo contenido de materia orgánica, son más proclives al proceso de erosión y desertificación (Asner *et al.*, 2004; Cornelis, 2006; Kéfi *et al.*, 2007).

La degradación de los recursos naturales de los pastizales en las zonas áridas y semiáridas como una forma de desertificación, es lo que más afecta al ecosistema donde se practica ganadería extensiva (Asner *et al.*, 2004). El manejo inadecuado de las áreas de pastoreo, ha propiciado una degradación física, lo cual las hace más vulnerables a la errática precipitación en la temporada de lluvia y a precipitaciones menores a las esperadas, generándose un problema para los habitantes de las comunidades rurales por la disminución de la capacidad productiva de sus áreas de agostadero (Pinedo *et al.*, 2013). Para minimizar los efectos de las sequías en las zonas áridas y semiáridas, es importante incorporar prácticas que permitan mitigar los efectos de años secos y su impacto en la economía de las comunidades de estas regiones (Velásquez *et al.*, 2012). El establecimiento de pastos en suelos con degradación física, implica la posibilidad de obtener alimento para el ganado y paralelamente mejorar la condición del terreno.

La cuenca media de los ríos Nazas-Aguanaval, es un área predominantemente de pastizal en condición árida. Esta región registra un deterioro ambiental por la existencia de terrenos dedicados a la ganadería extensiva con sobrepastoreo, y una pérdida parcial de la cubierta vegetal y de suelo (Chávez-Ramírez *et al.*, 2011). Para la rehabilitación de esta zona, es importante considerar especies de pastos tolerantes a las condiciones marginales y de estrés, tanto de tipo biótico, como abiótico (Cruz *et al.*, 2016). La incorporación al suelo de coberturas vegetales, así como el uso de retenedores de humedad, representan tecnologías para reducir la alta tasa de evaporación, tecnologías poco exploradas y aún no

bien valoradas para un eficiente establecimiento de vegetación en suelos degradados por efecto de la erosión y desertificación en zonas áridas. El objetivo de este estudio fue evaluar diferentes prácticas de conservación de humedad en el suelo para el establecimiento y desarrollo pastos en áreas degradadas de zonas áridas.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se llevó a cabo en San Luis del Cordero, Durango, México en el 2015. La región se ubica en los paralelos 25° 15' y 25° 31' N y los meridianos 104° 07' y 104° 33' O, a una altitud de 1,508 m. La temperatura máxima es de 40 °C en los meses de mayo a agosto, y la mínima es de 0 °C entre diciembre y marzo. El régimen de precipitación es de 362.1 mm anuales y ocurre de junio a octubre (IMTA, 2009).

Diseño experimental

Se usó un diseño experimental de bloques al azar en un arreglo de parcelas divididas con tres repeticiones. Las parcelas grandes fueron las dosis de rastrojo de maíz (0 y 10 t ha⁻¹); las parcelas medianas correspondieron a las dosis de hidrogel (0, 10 y 20 kg ha⁻¹); y las parcelas chicas fueron las dos especies de pastos *B. curtipendula* [Michx.] Torr.) y *C. gayana* Kunth; el primero corresponde a un pasto nativo y el segundo es un pasto introducido. Cada unidad experimental fue de 12 surcos de 12 m de largo x 5 m de ancho, con una superficie experimental de 2,160 m². La parcela útil correspondió a los seis surcos centrales, en los cuales se seleccionaron cuatro plantas al azar en las que se midieron las variables correspondientes.

La siembra del pasto se realizó en charolas de unicel en condiciones de invernadero el 15 de agosto de 2015. Como sustrato se utilizó peat moss. Se aplicaron riegos ligeros uniformes diariamente, evitando la deshidratación de las plántulas. La germinación ocurrió a los tres días después de la siembra en las dos especies de pasto.

El trasplante se hizo manualmente en el área experimental el 19 de septiembre de 2015. El rastrojo de maíz se aplicó superficialmente como cobertura vegetal antes del trasplante de los pastos. La aplicación del hidrogel se realizó manualmente, al mismo tiempo que el trasplante. El hidrogel fue depositado a la misma profundidad que el cepellón de la plántula, aplicando 1 y 2 g planta⁻¹. La distancia entre plantas fue de 50 cm, con una densidad de 26,667 plantas ha⁻¹. Los hidrogeles son copolímeros granulados que tienen un contenido de materia seca de 85 a 90 %, densidad aparente de 0.85 g mL⁻¹, peso específico de 1.10 g cm⁻³ y pH de 8.1 (SNF, 2016); tienen una capacidad de incrementar la retención de humedad del suelo y con ello aprovechar mejor el agua de lluvia o riego.

El temporal de lluvias ocurre en los meses de junio a octubre, donde la precipitación es suficiente para el desarrollo de los cultivos en la región (IMTA, 2009). Un escurrimiento superficial previo al trasplante, producto de una lluvia ocurrida el 11 de septiembre del 2015, con una precipitación de 27.8 mm, permitió el trasplante. La precipitación acumulada fue de 40.4 mm *in situ* entre los meses de septiembre a noviembre.

Medición de variables

Velocidad de germinación. Durante la etapa de germinación y crecimiento de la plántula en las charolas, se midió la velocidad de germinación de acuerdo a la Ecuación (2) (González *et al.*, 2015).

$$VG = \sum \frac{(ni)}{t} \quad (2)$$

Donde:

VG=Velocidad de germinación; n=Número de semillas germinadas en el día (i); t=Tiempo de germinación desde la siembra hasta la germinación de la última semilla.

En la etapa de campo, a los 15, 30, 45 y 60 días después del escurrimiento (DDE), se midió: contenido de humedad en el suelo (%) a las profundidades de 15 y 30

cm, mediante un determinador de humedad Lutron (Modelo PMS-714 Taipei, TPE); sobrevivencia de plántula (%), con un sistema de muestreo aleatorio con tramos de tres metros lineales por tratamiento a los 15 DDE; número de macollos, mediante conteo directo por planta; altura de planta (cm), con uso de cinta métrica; índice de clorofila (ICC), con medidor de clorofila Fieldsout CM 1000 (Plainfield IL, USA); contenido de materia seca (g) de la parte aérea y la raíz de la planta, mediante muestreo destructivo y secado en estufa de aire recirculante, HAFO® modelo 1600, USA, a una temperatura de 75 °C por 36 h.

Análisis estadístico

Se realizaron análisis de varianza y prueba de medias de Tukey ($p \leq 0.05$) entre tratamientos, con sus respectivas interacciones entre factores de variación en cada variable, así como un análisis de regresión para obtener las tasas de crecimiento con los modelos de mejor ajuste en la velocidad de germinación de semillas. Se usó el paquete estadístico SAS® Versión 9.3 (SAS, 1976).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Velocidad de germinación

La tasa logarítmica de germinación de *B. curtipendula* fue significativamente mayor ($p \leq 0.05$) respecto a *C. gayana*, con valores de 106.2 ($R^2 = 0.97$) y 91.9 ($R^2 = 0.95$), respectivamente (Figura 12). Este efecto de respuesta está relacionado al mecanismo de latencia de las especies nativas, referido a una alta capacidad de germinación (Carrillo *et al.*, 2009); pero aun cuando se tenga un porcentaje alto de germinación en especies exóticas, no existen evidencias claras para su éxito en la producción potencial (Carrillo *et al.*, 2009). Adicionalmente, se indica que una característica de *B. curtipendula*, es su rápida velocidad de germinación (Esqueda *et al.*, 2005).

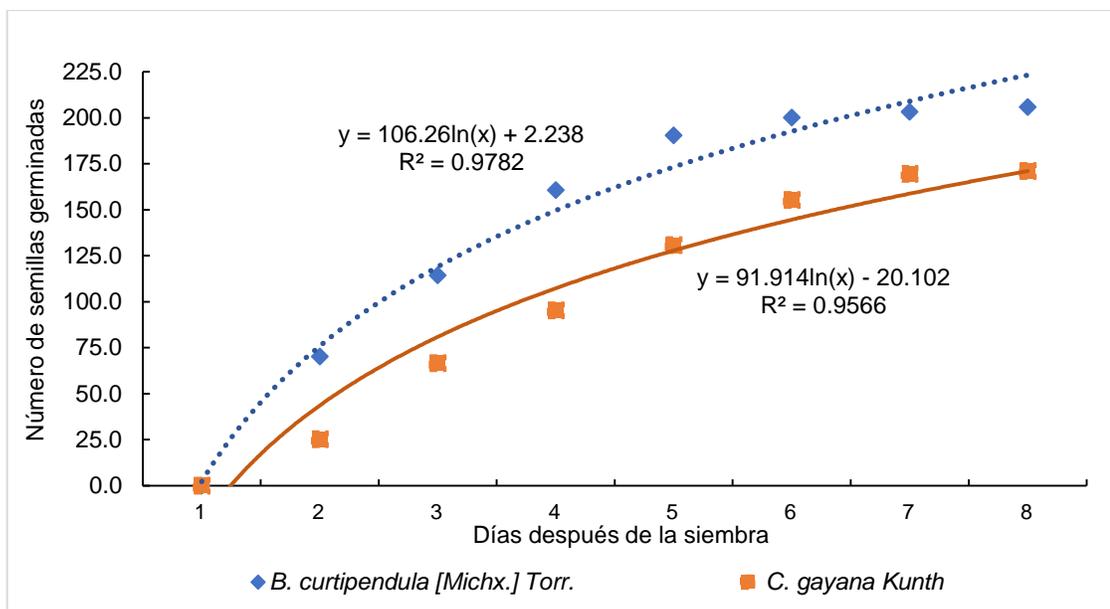


Figura 12. Tasa de germinación (no. de semillas día⁻¹) en pastos *B. curtipendula* [Michx.] Torr. y *C. gayana* Kunth.

Contenido de humedad en el suelo

Dado que no hubo efecto de interacción en esta variable, se presentan los promedios de los factores de variación por separado. El contenido de humedad fue significativamente ($p \leq 0.05$) mayor al aplicar hidrogel a los 15 días después del escurrimiento (DDE) en cada profundidad evaluada, al registrar valores en promedio 3.0 % superiores, con respecto al testigo. Este efecto fue diluido, en las fechas posteriores de evaluación para ambas profundidades. La tasa exponencial de abatimiento de humedad en el tiempo a los 15 cm de profundidad fue de -0.16 ($R^2 = 0.96$), -0.14 ($R^2 = 0.98$) y -0.10 ($R^2 = 0.98$) en los tratamientos de 20, 10 y 0 kg ha⁻¹ de hidrogel, respectivamente. Comportamiento similar se registró en la profundidad de 30 cm, con valores de tasas -0.09 ($R^2 = 0.99$), -0.13 ($R^2 = 0.97$) y -0.13 ($R^2 = 0.95$) en los tratamiento de 20, 10 y 0 kg ha⁻¹ de hidrogel, respectivamente (Figura 13). Los hidrogeles ofrecen propiedades de retención y liberación lenta de agua en el suelo, ya sea en condiciones de irrigación instantánea o prolongada, además de conservar la humedad en la zona radical de los cultivos (Barón-Cortés *et al.*, 2007); sin embargo en este estudio, las propiedades del hidrogel no se observaron en los muestreos posteriores a los 15

días después del escurrimiento (DDE) registrado. Estos resultados no coinciden con lo reportado por otros investigadores, quienes encontraron un mayor contenido de humedad del suelo al aplicar hidrogel en parcelas con maíz, lo cual incrementó significativamente la biomasa y optimizó el uso de agua por el cultivo (Dorrají *et al.*, 2010). Otros autores destacan las aplicaciones de hidrogel en pasto Buffel en climas áridos, mejoraron la emergencia de plántula, altura de planta, peso de materia seca y cobertura vegetal (Cruz *et al.*, 2016), lo cual puede estar asociado a que los hidrogeles mejoran significativamente la capacidad de absorción de agua fácilmente extraíble (RAW, por sus siglas en inglés) de los suelos; aunque la eficacia del gel en mejorar la retención de agua, varía de acuerdo al tipo de suelo (Narjary *et al.*, 2012).

La capacidad del hidrogel de retener el agua en el suelo, se asocia a la constante hidratación, condición que no se presentó en el sitio de estudio, debido a las bajas precipitaciones registradas durante el año; la ocurrencia de precipitaciones para zonas áridas y semiáridas es poco homogénea y variable en el tiempo.

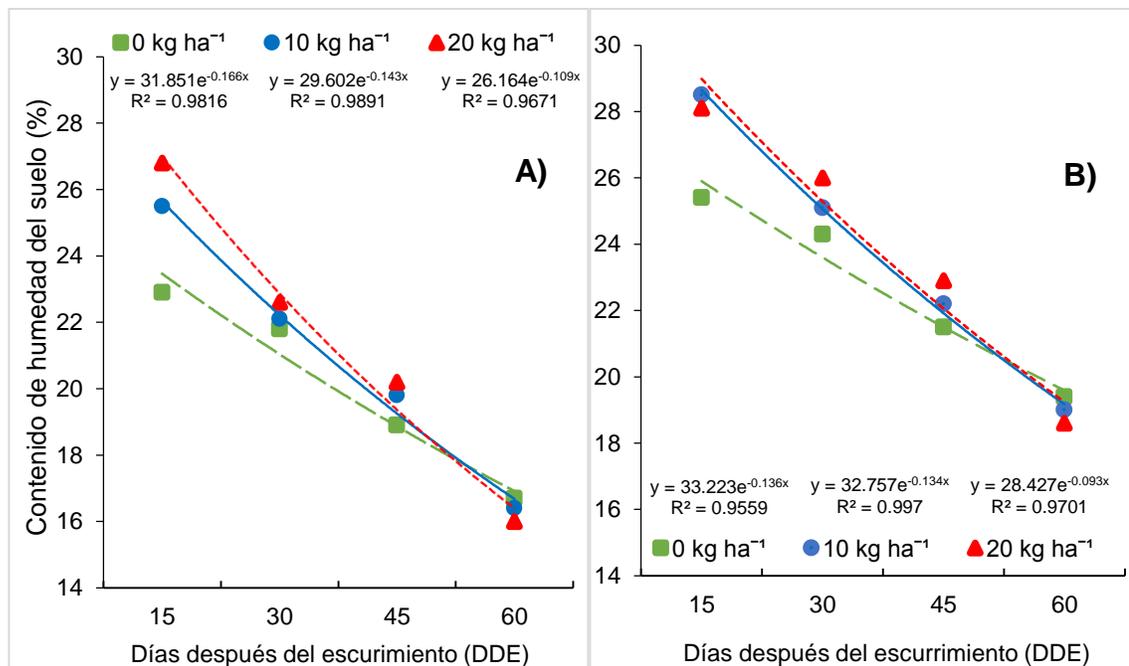


Figura 13. Abatimiento de humedad a 15 cm (A) y 30 cm (B) de profundidad del suelo en diferentes contenidos de hidrogel y diferentes fechas de muestreo: 15, 30 y 45 y 60 días después del escurrimiento (DDE).

Respecto al uso de cobertura vegetal a base de rastrojo de maíz, el contenido de humedad en ambas profundidades evaluadas, se mantuvo superior ($p \leq 0.05$) en 3.2 % en cada fecha de evaluación con respecto a donde no se adicionó el residuo de cosecha (Figura 14). La humedad aprovechable para este tipo de suelo es 18 %, dado que la CC es 33 % y el PMP de 15 %. En el tratamiento sin aplicación de rastrojo llegó a valores de 16 % a los 45 y 60 DDE, muy próximos al PMP; en cambio, donde se aplicó el rastrojo, el suelo siempre mantuvo contenidos de humedad superiores a 18.0 %, con una tasa de abatimiento de humedad exponencial negativa de -0.12 ($R^2=0.99$) y -0.18 ($R^2=0.98$) en la profundidad de 15 cm y 30 cm, respectivamente; el tratamiento sin rastrojo registró tasas de -0.13 ($R^2=0.99$) a los 15 cm de profundidad y -0.14 ($R^2=0.97$) a los 30 cm de profundidad. En promedio, el tratamiento con rastrojo de maíz conservó 3.7 y 3.1 % más contenido de humedad, con respecto al testigo a los 15 y 30 cm de profundidad, respectivamente.

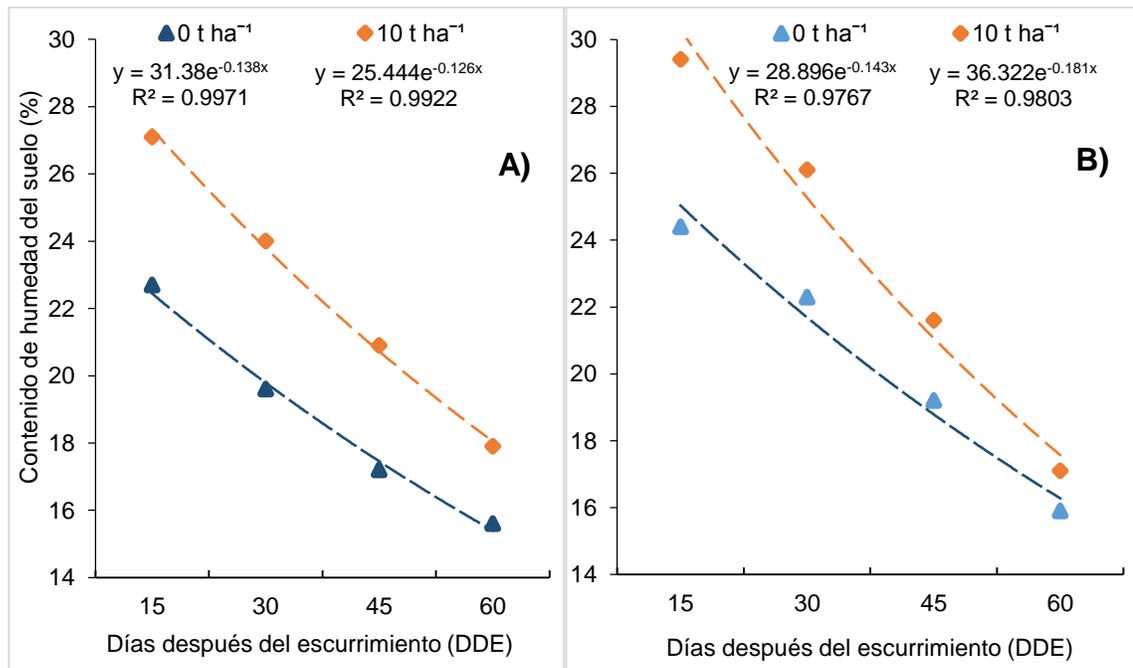


Figura 14. Abatimiento de humedad a 15 cm (A) y 30 cm (B) de profundidad del suelo con y sin cobertura a base de rastrojo de maíz en diferentes fechas de muestreo: 15, 30 y 45 y 60 días después del escurrimiento (DDE).

Los anteriores resultados coinciden con estudios que señalan que la utilización de mantillo o residuo de cosecha en la producción de soya y sorgo de secano, el

mayor contenido de humedad en el suelo al aplicar mantillo en ambos cultivos, principalmente en años con precipitaciones irregulares (Obalum *et al.*, 2012). Adicionalmente, se indica que la incorporación de mantillo o rastrojos a los cultivos, representa una práctica cultural importante, ya que desempeña un papel esencial en la conservación de humedad en el suelo; las coberturas orgánicas e inorgánicas, en promedio registraron un contenido más alto de humedad edáfica para la capa activa del suelo (0-40 cm) en tres años de evaluación, con un 18 % de humedad en campo con cobertura de paja, mientras que el tratamiento sin cobertura obtuvo 16.2 % de humedad (Taparuskienė & Miseckaitė, 2014); la aplicación combinada de paja y mantillo e incorporación de paja al primer perfil de suelo, mejoró la retención de agua del suelo en un 2.1-10.4 % y la salinidad de la capa superficial disminuyó 5.4-23.0 % (Zhao *et al.*, 2014).

Sobrevivencia de plántula

B. curtispindula y *C. gayana* tuvieron una supervivencia superior al 84 %, seis semanas después del trasplante, sin diferencias estadísticas entre ambas especies. El alto porcentaje de supervivencia antes citado, pudiera estar asociados al método de siembra en trasplante, ya que el método simple de siembra directa de semilla en campo, es solo del 10 % y en algunos casos del 50 % (González *et al.*, 2015). Se han encontrado valores superiores al 95 % de establecimiento en pasto Buffel al utilizar el método del trasplante, considerado un método de siembra altamente efectivo aún en suelos con limitada fertilidad natural (González *et al.*, 2015).

El porcentaje de supervivencia de los pastos fue de 78.6 y 76.4 % en las dosis de hidrogel de 20 kg ha⁻¹ y 10 kg ha⁻¹, respectivamente, sin diferencia estadística entre ambos, con una mejor tendencia de respuesta en la dosis de 20 kg ha⁻¹, al diferenciarse estadísticamente del testigo. El porcentaje de supervivencia, fue significativamente mayor ($p \leq 0.05$) al aplicar el rastrojo de maíz (89.9 %), respecto cuando no se aplicó (81.2 %) (Cuadro 9). Al no aplicar la cobertura vegetal, el porcentaje de supervivencia de especies forestales se reduce significativamente, hasta un 66.7 % (Nissen & Ovando, 1999). La aplicación de rastrojo como

cobertura vegetal en los cultivos, mejora la retención de humedad del suelo al reducir la evaporación, además de crear un microclima (temperatura y humedad) adecuado para la germinación de la semilla, supervivencia y desarrollo del cultivo en su fase inicial (Julca-Otiniano *et al.*, 2006).

Cuadro 9. Porcentaje de sobrevivencia por especie de pasto, diferentes dosis de hidrogel y cobertura vegetal a base de rastrojo de maíz.

Especie de pasto/Dosis de Retenedor de humedad	Porcentaje de sobrevivencia
BC	87.03 a \pm 1.3
CG	84.12 a \pm 1.7
Hidrogel	
0 kg ha ⁻¹	72.93 b \pm 0.9
10 kg ha ⁻¹	76.42 a \pm 1.5
20 kg ha ⁻¹	78.64 a \pm 1.2
Rastrojo de maíz	
0 t ha ⁻¹	81.21 b \pm 1.4
10 t ha ⁻¹	89.94 a \pm 1.6

BC= *B. curtipendula* [Michx.] Torr.; CG= *C. gayana* Kunth

^{ab} Cifras con diferentes letras dentro de una misma columna y en cada factor de variación (hidrogel y rastrojo de maíz), son estadísticamente diferentes ($p \leq 0.05$).

Número de macollos; altura de planta e índice de clorofila

No hubo efecto de interacción entre la cobertura con rastrojo de maíz y las dosis de hidrogel utilizadas en ninguna de las características de desarrollo y crecimiento de la planta; en un análisis estadístico por factor de variación por separado, tampoco el hidrogel mostró efecto en ninguna de las variables antes citadas. La cobertura vegetal a base de rastrojo de maíz a dosis de 10 t ha⁻¹ mejoró significativamente ($p \leq 0.05$) todas las variables: la altura de planta registró 37.2 cm, 3.8 macollos e índice de clorofila con 121.5 en el pasto introducido; el pasto nativo reportó valores de altura de 31.9 cm, 7.1 macollos e índice de clorofila de 98.5. El pasto introducido fue superior 55.5 % en altura, 16.6 % en macollos y 23.3 % en el índice de clorofila con respecto al pasto nativo (Cuadro 10).

Cuadro 10. Características morfométricas en dos especies de pasto en diferentes dosis de hidrogel y cobertura vegetal a base de rastrojo de maíz.

Dosis de Retenedor de humedad	Número de macollos		Altura de planta (cm)		ICC	
	BC	CG	BC	CG	BC	CG
Hidrogel (kg ha ⁻¹)						
0 kg ha ⁻¹	5.6 a ±1.0	3.5 a ±0.8	26.9 a ±4.8	33.1 a ±4.8	98.6 a ±5.3	114.3 a ±5.1
10 kg ha ⁻¹	5.7 a ±0.9	3.6 a ±0.9	27.7 a ±5.2	34.9 a ±4.6	95.9 a ±4.7	113.2 a ±5.7
20 kg ha ⁻¹	5.9 a ±1.1	3.2 a ±0.9	27.2 a ±4.3	32.6 a ±3.6	97.8 a ±4.3	109.8 a ±6.2
Rastrojo de maíz (t ha ⁻¹)						
0 t ha ⁻¹	4.4 b ±0.9	3.0 b ±0.7	22.6 b ±2.6	29.5 b ±3.1	84.4 b ±6.4	107.8 b ±6.7
10 t ha ⁻¹	7.1 a ±0.8	3.8 a ±0.8	31.9 a ±3.3	37.2 a ±3.4	98.5 a ±5.9	121.5 a ±7.4

BC= *B. curtipendula* [Michx.] Torr.; CG= *C. gayana* Kunth; ICC= Índice de contenido de clorofila.
^{ab} Cifras con diferentes letras dentro de una misma columna y en cada factor de variación (hidrogel y rastrojo de maíz), son estadísticamente diferentes ($p \leq 0.05$).

Estos resultados coinciden con los reportados por algunos autores (Ravisankar *et al.*, 2014), quienes indican que la adición de mantillo o cobertura vegetal, sobre una leguminosa, influyó significativamente en algunos atributos agronómicos como el crecimiento de las plantas, el rendimiento y la calidad nutricional del cultivo. Se ha encontrado que la aplicación de mantillo o paja en suelo salinos, aumentó significativamente el crecimiento de la planta, rendimiento de forraje en el pasto guinea (Kusmiyati *et al.*, 2013). Otros autores como Beggy & Fehmi (2016), reportaron que la incorporación de mantillo al suelo para establecimiento de gramíneas, obtuvo resultados significativamente superiores en relación a tratamientos sin adición de paja, al tener mayor cantidad de vegetación de pastos y biomasa.

Contenido de materia seca aérea y radical de planta

El efecto del rastrojo estuvo relacionado con un mayor contenido de humedad edáfica y distribuida de forma más uniforme, lo cual permitió en la última fecha de muestreo un rendimiento superior ($p \leq 0.05$) de biomasa en *C. gayana* de 73.2 g planta⁻¹ y en *B. curtipendula* de 57.2 g planta⁻¹, respecto a no aplicar rastrojo; en promedio en cada una de las evaluaciones efectuadas, la dosis de rastrojo se asoció a rendimiento superiores de 24.9 % en el pasto nativo y 25.6 % en el pasto introducido, respecto del testigo (Cuadro 11). En cambio, en las dosis de hidrogel, la producción de biomasa aérea solo mostró diferencias estadísticas ($p \leq 0.05$) a los 30 DDE al aplicar 10 kg ha⁻¹ (14.7 g planta⁻¹) y 20 kg ha⁻¹ (13.3 g planta⁻¹), sin diferencia estadística en la primera dosis con el testigo (11.0 g planta⁻¹) en *B. curtipendula*, En el caso de *C. gayana*, se obtuvieron 25.6 y 24.3 g planta⁻¹ en las dosis de 20 y 10 kg ha⁻¹, respectivamente, con diferencia estadística respecto al testigo (17.5 g planta⁻¹). En las dos evaluaciones posteriores, se dejó de mostrar el efecto antes citado, lo cual puede estar relacionado al efecto de dilución identificado en el contenido de humedad en el suelo. La adición de rastrojo, incrementó significativamente ($p \leq 0.05$) la biomasa radical, al obtener el mayor peso al término del ciclo vegetativo en pasto nativo (25.5 g planta⁻¹) e introducido (32.6 g planta⁻¹). El incremento promedio de biomasa de la raíz en la dosis de rastrojo fue de 43.1 % en nativo y 38.3 % en el introducido, con respecto a no aplicar la cobertura vegetal, en las tres evaluaciones realizadas (Cuadro 12).

Cuadro 11. Producción de biomasa aérea en peso seco de dos especies de pastos en diferentes dosis de hidrogel y rastrojo de maíz.

Dosis de Retenedor de humedad	Peso seco de biomasa aérea de planta (g)					
	30 DDE		45 DDE		60 DDE	
	BC	CG	BC	CG	BC	CG
	Hidrogel (kg ha ⁻¹)					
0 kg ha ⁻¹	11.0 b ± 1.7	17.5 b ± 3.3	45.1 a ± 6.0	57.9 a ± 5.5	53.3 a ± 7.1	68.0 a ± 7.0

10 kg ha ⁻¹	13.3 ab ± 2.2	24.3 a ± 4.1	42.8 a ± 5.9	56.0 a ± 5.8	51.5 a ± 6.3	66.8 a ± 7.6
20 kg ha ⁻¹	14.7 a ± 2.0	25.6 a ± 4.9	44.7 a ± 5.3	56.9 a ± 4.2	51.6 a ± 6.2	67.7 a ± 5.8
Rastrojo de maíz (t ha ⁻¹)						
0 t ha ⁻¹	12.3 b ± 2.1	20.4 b ± 1.6	39.8 b ± 3.3	52.3 b ± 2.7	47.2 b ± 4.4	61.1 b ± 2.8
10 t ha ⁻¹	16.1 a ± 0.9	28.6 a ± 1.9	48.8 a ± 3.9	61.1 a ± 2.8	57.2 a ± 4.5	73.2 a ± 3.2

BC= *B. curtipendula* [Michx.] Torr.; CG= *C. gayana* Kunth DDT= Días después del primer escurrimiento.

^{ab} Cifras con diferentes letras dentro de una misma columna y en cada factor de variación (hidrogel y rastrojo de maíz), son estadísticamente diferentes ($p \leq 0.05$).

Cuadro 12. Producción de biomasa en peso seco de raíz de dos especies de pastos en diferentes dosis de hidrogel y rastrojo de maíz.

Dosis de Retenedor de humedad	Peso seco de biomasa radical de planta (g)					
	30 DDE		45 DDE		60 DDE	
	BC	CG	BC	CG	BC	CG
Hidrogel (kg ha ⁻¹)						
0 kg ha ⁻¹	5.0 b ± 0.5	9.1 b ± 1.2	19.5 a ± 4.8	24.3 a ± 4.3	22.9 a ± 4.5	29.0 a ± 4.3
10 kg ha ⁻¹	6.6 a ± 1.0	11.7 a ± 2.2	17.7 a ± 3.3	24.6 a ± 3.7	21.7 a ± 3.2	29.5 a ± 4.1
20 kg ha ⁻¹	6.3 a ± 0.8	11.9 a ± 2.1	19.0 a ± 3.5	25.5 a ± 3.7	22.5 a ± 3.6	28.9 a ± 3.6
Rastrojo de maíz (t ha ⁻¹)						
0 t ha ⁻¹	4.7 b ± 1.8	9.2 b ± 1.1	15.5 b ± 2.4	20.9 b ± 1.5	19.4 b ± 1.9	25.3 b ± 1.3
10 t ha ⁻¹	7.3 a ± 0.6	13.9 a ± 1.4	22.1 a ± 2.2	28.2 a ± 1.2	25.5 a ± 2.3	32.6 a ± 1.6

BC= *B. curtipendula* [Michx.] Torr.; CG= *C. gayana* Kunth; DDT= Días después del primer escurrimiento.

^{ab} Cifras con diferentes letras dentro de una misma columna y en cada factor de variación (hidrogel y rastrojo de maíz), son estadísticamente diferentes ($p \leq 0.05$).

Estos resultados coinciden con estudios que encontraron que una mayor cantidad de biomasa al aplicar mantillo o rastrojo sobre la superficie del suelo (Beggy & Fehmi, 2016). Otros autores como Kusmiyati *et al.* (2013), obtuvieron aumentos significativamente mayores en el rendimiento de forraje en pasto guinea al adicionar paja al suelo. El hidrogel, ha mostrado un uso más eficiente del agua, lo cual mejora el crecimiento de plantas (El-Hady & Adam, 2002), sin embargo, este efecto no fue sostenido en el tiempo de evaluación de este estudio. Respecto a los pastos introducidos, donde se indica que ofrecen ventajas a las variedades nativas, tales como su rápida adaptación y crecimiento (Velázquez *et al.*, 2015; Velásquez *et al.*, 2014), se señala que la principal ventaja de estos pastos es la producción de biomasa, la cual es superior en comparación a algunas especies nativas (Loredo & Beltrán, 2001). Lo anterior coincide con este estudio. Por lo anterior, existe un gran interés de los ganaderos de la región en este tipo de materiales; los cuales, incrementan la disponibilidad de materia seca y reducen el déficit de forraje en la región.

CONCLUSIONES

El pasto nativo (*B. curtipendula*) tiene mejores ventajas con respecto a la variedad introducida (*C. gayana*) en fases fenológicas iniciales, mediante una mayor capacidad germinativa y mayor velocidad de germinación, sin embargo, el pasto introducido registró una mayor altura, mejor amacollamiento y un mayor índice de clorofila, y como consecuencia una mayor producción de biomasa.

La aplicación de rastrojo incrementó en un 16.9 % el contenido de humedad del suelo, lo cual incrementó la producción de biomasa aérea, con respecto al testigo. Las dosis de hidrogel solo influyeron en un mejor porcentaje de establecimiento y un mayor contenido de humedad edáfica durante los primeros 15 días de realizado en trasplante, sin ningún efecto posterior durante la fase de crecimiento y desarrollo de los pastos.

AGRADECIMIENTOS

Al personal técnico y científico del Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relaciones Agua Suelo Planta Atmósfera del INIFAP en Gómez Palacio, Dgo. por el apoyo técnico para realizar el presente estudio en el área experimental establecida por este Centro en San Luis del Cordero, Dgo.

LITERATURA CITADA

- Asner, G. P., Elmore, A. J., Olander, L. P., Martin, R. E. & Thomas-Harris, A. (2004). Grazing systems, ecosystem responses, and global change. *Annual Review of Environment and Resources*, 29, 261-299. doi: 10.1146/annurev.energy.29.062403.102142
- Barón-Cortés, A., Barrera-Ramírez, I. X., Boada-Eslava, L. F. & Rodríguez-Niño, G. (2007). Evaluación de hidrogeles para aplicaciones agroforestales. *Ingeniería e Investigación*, 27(3), 35-44.
- Beggy, H. M. & Fehmi, J. S. (2016). Effect of surface roughness and mulch on semi-arid revegetation success, soil chemistry and soil movement. *Catena*, 143, 215-220. doi: 10.1016/j.catena.2016.04.011
- Carrillo S., S. M., Arredondo M., T., Huber-Sannwald, E. & Flores R., J. (2009). Comparación en la germinación de semillas y crecimiento de plántulas entre gramíneas nativas y exóticas del pastizal semiárido. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 47(3), 299-312.
- Chávez-Ramírez, E., González-Cervantes, G., González-Barrios, J. L. & López D., A. (2011). La evapotranspiración en la cuenca baja media del río Nazas. En Oswald S., U. (Ed.). *Retos de la Investigación del Agua en México* (121-129). Cuernavaca, México: Centro Regional de Investigaciones Multidisciplinarias, Universidad Nacional Autónoma de México/Scientific Network on Water–National Council on Science and Technology.

- Cornelis, W. M. (2006). Hydroclimatology of wind erosion in arid and semiarid environments. En D´Odorico & Porporato, A. (Eds.). *Dryland Ecohydrology* (141-161). Netherlands: Springer. doi: 10.1007/1-4020-4260-4
- Cruz M., A., Pedroza S., A., Trejo C., R, Sánchez C., I, Samaniego G., J. A. & Hernández S., J. R. (2016). Captación de agua de lluvia y retención de humedad edáfica en el establecimiento de buffel (*Cenchrus ciliaris* L.). *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 7(2), 159-172. doi: 10.22319/rmcp.v7i2.4171
- Dorraj, S. S., Golchin, A. & Ahmadi, S. (2010). The effects of hydrophilic polymer and soil salinity on corn growth in sandy and loamy soils. *Clean–Soil, Air, Water*, 38(7), 584-591. doi: 10.1002/clen.201000017
- El-Hady, O. A. & Adam, S. M. (2002). Sand-Compost-Hydrogel mix for low cost production of tomato seedlings. *Egyptian Journal of Soil Science (Egypt)*, 42, 767-782.
- Esqueda C., M. H., Melgoza C., A, Sosa C., M., Carrillo R., R. & Jiménez C., J. (2005). Emergencia y sobrevivencia de gramíneas con diferentes secuencias de humedad-sequía en tres tipos de suelo. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 43(1), 101-115.
- González D., J. R., Gómez M., S. & López D., A. (2015). *El trasplante garantiza establecer zacates forrajeros en suelos salinos y arcillosos*. Memorias del VI Congreso Internacional de Manejo de Pastizales. Durango. Dgo. 464 p.
- IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua). (2009). Extractor rápido de información climatológica (ERIC III). 2.0. Servicio Meteorológico Nacional. México, D.F.
- Julca-Otiniano, A., Meneses-Florián, L., Blas-Sevillano, R. & Bello-Amez, S. (2006). La materia orgánica, importancia y experiencia de su uso en la agricultura. *Idesia (Arica)*, 24(1), 49-61. doi: 10.4067/S0718-34292006000100009

- Kéfi, S., Rietkerk, M., Alados, C. L., Pueyo, Y., Papanastasis, V. P., ElAich, A. & De Ruiter, P. C. (2007). Spatial vegetation patterns and imminent desertification in Mediterranean arid ecosystems. *Nature*, 449(7159), 213-217. doi: 10.1038/nature06111
- Kusmiyati, F., Sumarsono, S., Karno, K. & Pangestu, E. (2013). Effect of mulch and mixed cropping grass-legume at saline soil on growth, forage yield and nutritional quality of Guinea grass. *Journal of the Indonesian Tropical Animal Agriculture*, 38(1), 72-78. doi: 10.14710/jitaa.38.1.72-78
- Loredo O., C. & Beltrán L., S. (2001). *Establecimiento y manejo de pasto Klein en el altiplano potosino*. Folleto técnico No. 24. San Luis Potosí, SLP Méx: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. CIR-Noreste.
- Narjary B., Aggarwal, P., Singh, A., Chakraborty, D. & Singh, R. (2012). Water availability in different soils in relation to hydrogel application. *Geoderma* (187-188), 94-101. doi: 10.1016/j.geoderma.2012.03.002
- Nissen, M. & Ovando, C. (1999). Efecto de un hidrogel humectado aplicado a las raíces de *Nothofagus obliqua* (MIRB.) OERST. y *Nothofagm dombeyi* (MIRB.) OERST. durante su trasplante. *Agro sur*, 27(2), 48-58.
- Obalum, S. E., Igwe, C.A. & Eze, O. M. (2012). Soil moisture dynamics under rainfed sorghum and soybean on contrasting tillage–mulch seedbeds in a mineral sandy loam at derived savanna of south-eastern Nigeria. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 58(11), 1205-1227. doi: 10.1080/03650340.2011.575065
- Pinedo, A. C., Hernández Q., N. S., Melgoza, C. A, Rentería, V. M., Vélez S., V. C., Morales, N. C., Santellano, E. E. & Esparza E. (2013). *Diagnóstico Actual y Sustentabilidad de los Pastizales del estado de Chihuahua ante el Cambio Climático*. Cuerpo Académico de Recursos Naturales y Ecología (UACH-CA16). Chihuahua, Méx.: Facultad de Zootecnia y Ecología, Universidad Autónoma de Chihuahua.

- Ravisankar, N., Balakrishnan, M., Ambast, S. K., Srivastava, R. C., Bommayasamy, N. & Subraman, T. (2014). Influence of irrigation and crop residue mulching on yield and water productivity of table purpose groundnut (*Arachis hypogaea*) in humid tropical island. *Legume Research: An International Journal*, 37(2), 195-200. doi: 10.5958/j.0976-0571.37.2.029
- SAS. Institute Statistical Analysis System. (1976). *The SAS System for Windows Version 9.3*. North Carolina, USA: SAS Institute Inc. Cary.
- SNF Inc. 2016. *Water retainers for soils and substrates*. Recuperado de https://snf.com.au/downloads/Aquasorb_E.pdf
- Taparauskienė, L. & Miseckaitė, O. (2014). Effect of mulch on soil moisture depletion and strawberry yield in sub-humid area. *Polish Journal of Environmental Studies*, 23(2), 475-482.
- Velásquez V., M. A., Alba Á., A., Gutiérrez L., R. & García E., G. (2012). *Prácticas de restauración de suelos para la conservación del agua*. Folleto Técnico No. 46. Zacatecas: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. CIRNOC.
- Velásquez, V., M. A., Muñoz V., J. A., Macías H., R., Esquivel A., G. & Rivera G., M. (2014). Producción de forraje de variedades de zacate buffel [*Pennisetum ciliare* L. (Link.) Sin. *Cenchrus ciliaris* L.] en la región árida del Estado de Durango, México. *AGROFAZ*, 14 (1), 69-76.
- Velázquez M., M., Hernández G., F.J., Cervantes B., J.F. & Gámez V., H. G. (2015). *Establecimiento de pastos nativos e introducidos en zonas áridas de México*. San Luis Potosí, SLP Méx.: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. CIR-Noreste.
- Zhao, Y., Pang, H., Wang, J., Huo, L. & Li, Y. (2014). Effects of straw mulch and buried straw on soil moisture and salinity in relation to sunflower growth and yield. *Field Crops Research*, 161, 16-25. doi: 10.1016/j.fcr.2014.02.006

CAPÍTULO V

SOBREVIVENCIA, CRECIMIENTO Y PRODUCCIÓN DE *Bouteloua gracilis* H.B.K [Lag.] Y *Pennisetum ciliare* L. EN ÁREAS DEGRADADAS DEL NORTE DE MÉXICO

RESUMEN

Se evaluó el efecto de dos métodos de siembra y retenedores de humedad del suelo, en el establecimiento, crecimiento y producción de dos pastos en áreas degradadas del municipio de Mapimí, Dgo. Una evaluación preliminar de la degradación del sitio experimental fue realizada. Después, se usó un diseño de bloques al azar en un arreglo de parcelas divididas con tres repeticiones. Las parcelas grandes correspondieron a la dosis de rastrojo (0 y 10 ton ha⁻¹), las parcelas medianas a las dosis de hidrogel (0 y 20 kg ha⁻¹) y las parcelas chicas las dos especies de pasto, navajita como nativo (*Bouteloua gracilis* H.B.K [Lag.]) y Buffel como introducido (*Pennisetum ciliare* L.). Se utilizó la siembra directa y trasplante. Se hicieron evaluaciones durante el 2016 y 2017. El porcentaje de establecimiento fue igual o superior al 83 % en el método por trasplante y 53 % en siembra directa. Sin embargo, en los tratamientos con aplicación de rastrojo los niveles de humedad fueron superiores ($p \leq 0.01$). La altura de planta, fotosíntesis, transpiración, conductancia estomática, biomasa aérea, radical y rendimiento fueron mayores en *P. ciliare*, esta respuesta se incrementó en los tratamientos con trasplante y aplicación de rastrojo. *B. gracilis* fue más eficiente en el uso del agua y superior proteicamente. Las aplicaciones de hidrogel al suelo no se asociaron a las variables medidas en este estudio.

Palabras clave: Humedad del suelo, pastos, fotosíntesis, rendimiento, reconversión productiva.

Tesis de Doctorado en Ciencias, Posgrado en Recursos Naturales y Medio Ambiente en Zonas Áridas, Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas, Universidad Autónoma Chapingo
Autor: Luis Gerardo Yáñez Chávez
Director de Tesis: Aurelio Pedroza Sandoval

SURVIVAL, GROWTH AND PRODUCTION OF *Bouteloua gracilis* H.B.K [Lag.] AND *Pennisetum ciliare* L. IN DEGRADED AREAS OF NORTHERN MEXICO

ABSTRACT

The effect of two methods of sowing and soil moisture retainers on the establishment, growth and production of two grasses in degraded areas of the municipality of Mapimí, Dgo., was evaluated. A preliminary evaluation of the degradation of the experimental site was made. Afterward, a randomized block design was used in an arrangement of divided plots with three repetitions. The large plots corresponded to the stubble doses (0 and 10 ton ha⁻¹), the medium plots to the hydrogel doses (0 and 20 kg ha⁻¹) and the small plots the two species of grasses, blue grama as native (*Bouteloua gracilis* H.B.K [Lag.]) and Buffel as introduced (*Pennisetum ciliare* L.). Direct sowing and transplant were used. Evaluations were made during 2016 and 2017. The percentage of establishment was equal or superior to 83 % in the method by transplant and 53 % in direct seeding. However, in the treatments with stubble application the humidity levels were higher ($p \leq 0.01$). Plant height, photosynthesis, transpiration, stomatal conductance, aerial biomass, root biomass and yield were higher in *P. ciliare*, this response is increased in treatments with transplant and stubble application. *B. gracilis* was more efficient in water use and superior in protein. The hydrogel applications to the soil were not associated to the measured variables in this study.

Key words: Soil moisture, grasses, photosynthesis, yield, productive reconversion.

INTRODUCCIÓN

Por el severo deterioro de los pastizales de Norteamérica, destaca la importancia de recuperar la productividad de estos ecosistemas mediante prácticas de rehabilitación como la resiembra de pastizales, en la cual la elección de las especies a resembrar es crítica dado el costo relativamente alto y la baja probabilidad de éxito de esta práctica (Moreno-Gómez *et al.*, 2012). *Bouteloua gracilis* H.B.K [Lag.], por su versatilidad ecológica es considerado el pasto más promisorio para la revegetación de los pastizales semiáridos (Quero-Carrillo & Miranda, 2013). Igualmente, el zacate Buffel se introdujo al norte de México, como una especie introducida apta para rehabilitar áreas degradadas con problemas de erosión, así como productora de forraje o nodriza en la siembra de pastizales (Cox *et al.*, 1988).

Debido a la degradación de los pastizales de Norteamérica y la importancia de llevar a cabo la siembra de pastos con alta capacidad forrajera, es necesario estudiar los factores que afectan el establecimiento de éstos, principalmente en ambientes áridos y semiáridos.

A pesar de su importancia económica, ecológica y de ser considerado el pasto más promisorio para la revegetación de los pastizales semiáridos, el zacate navajita no es considerado como una alternativa viable para la resiembra de pastizales debido a las dificultades para establecerse en su ambiente natural (Wilson & Briske, 1979), aunque Wilson *et al.* (1976) indican algunas de las características de tolerancia a la sequía en plantas adultas de este pasto.

Respecto al zacate Buffel, ha sido una especie abundantemente utilizada en programas para la promoción de siembra, debido a su variabilidad climática y rápida diseminación, representa una perspectiva para la recuperación de agostaderos degradados (Ramírez-Lozano *et al.*, 2001). Sin embargo, no prospera en condiciones de sequía (Ibarra-Flores *et al.*, 1995). Bajo estas condiciones, las prácticas de captación y conservación de agua, podrían ser la única alternativa para el establecimiento de la planta (Cox *et al.*, 1988).

La recuperación o rehabilitación de un pastizal consiste en la restitución de su capacidad productiva por unidad de área y por animal, hasta alcanzar grados ecológicos y económicos aceptables. El término rehabilitación supone la presencia de una o más especies forrajeras deseables que son susceptibles a ser conservadas, estimuladas o complementadas (Spain & Gualdrón, 1991). De ahí que, en el momento de aplicar alguna labor de recuperación del pastizal se debe tener en cuenta que las especies deseables tengan una aceptable composición botánica (Padilla *et al.*, 2009).

Ante la importancia de realizar la elección más adecuada de la especie a utilizar en los programas de rehabilitación de los pastizales semiáridos del norte de México, es importante considerar especies de pastos tolerantes al estrés hídrico, factor ambiental más importante para el crecimiento y desarrollo de las plantas en las zonas áridas y semiáridas.

Igualmente, la implementación de técnicas de siembra como el trasplante, incorporación al suelo de coberturas vegetales y uso de retenedores de humedad, puede incrementar las probabilidades de éxito de estas prácticas en campo. En el presente estudio, la integración de éstas técnicas se emplearon para evaluar el establecimiento, crecimiento y producción de dos pastos con relevancia forrajera, *B. gracilis*, una especie nativa, y *P. ciliare*, una especie introducida.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se llevó a cabo en el municipio de Mapimí, del estado de Durango, México, localizado a 25° 52' 23.65" N y 103° 43' 41.74" O, y a una altitud de 1,176 m. Con clima BWhw(e), que corresponde a muy árido, semicálido con lluvias en verano y de amplitud térmica extrema. La precipitación promedio anual es de 260 mm y la evaporación anual de 2,346.9 mm. El promedio de temperatura máxima mensual es de 28.4 °C y la temperatura mínima mensual media es de 10.5 °C (SMN, 2010). El suelo donde se estableció el experimento, corresponde a un suelo superficial calcáreo con 13 % de carbonatos totales (CaCO₃), pH de

8.2, relativamente pobre en materia orgánica con un valor menor de 2.3 % y de textura franco arcilloso (Ortíz-Cano *et al.*, 2009).

Evaluación preliminar de la degradación del pastizal en el área de estudio

Para la evaluación de la condición del pastizal en el sitio experimental, se integró una metodología rápida con indicadores cualitativos que evalúan suelo, hidrología y vegetación con un enfoque de rangos (Pellant *et al.*, 2018).

Se seleccionarán, al azar, 10 sitios del área experimental para realizar la evaluación de la condición del área de pastizal, mediante mediciones categóricas de campo; se asignaron valores del tipo de vegetación y atributos del ecosistema, de acuerdo con los 17 indicadores establecidos en la metodología (Cuadro 13).

Cuadro 13. Indicadores que califican a los atributos de un ecosistema.

Indicador	Atributos físicos observados en los pastizales	Características de la condición del pastizal		
		SS	HF	BI
1	Arroyuelos	x	x	
2	Patrones de flujo de agua	x	x	
3	Pedestales o terracetos	x	x	
4	Suelo desnudo	x	x	
5	Cárcavas	x	x	
6	Viento y/ o áreas de deposición	x		
7	Movimiento del suelo		x	
8	Resistencia de la superficie del suelo a la erosión	x	x	x
9	Pérdida de superficie del suelo o degradación	x	x	x
10	Composición de la comunidad de plantas y distribución relativa a infiltración y escurrimiento		x	
11	Capa de compactación	x	x	x
12	Grupos funcionales / estructurales			x
13	Mortalidad de plantas / decadencia			x
14	Cantidad removida		x	x
15	Producción anual			x
16	Plantas invasoras			x
17	Capacidad reproductiva de las plantas perennes			x

Estabilidad de suelo/sitio (SS), funcionalidad hidrológica (HF) e integridad biótica (BI).

Se utilizó una escala ordinal asignando un valor ascendente a partir de uno, el cual se otorga a una condición extrema (1) seguido por el intervalo de moderada a extrema (2), de moderada (3), de ligera a moderada (4) y, de nula a ligera (5), (Echavarría-Chairez *et al.*, 2015).

La integración de los tres componentes en la valoración visual, correspondió a un valor de 2.3, el cual se interpreta que la condición o estado de degradación en la que se encontraba el sitio experimental, es de moderada a extrema.

Diseño experimental

Un diseño experimental de bloques al azar en un arreglo de parcelas divididas con tres repeticiones fue usado. Las parcelas grandes fueron las dosis de rastrojo de maíz (0 y 10 t ha⁻¹); las parcelas medianas correspondieron a las dosis de hidrogel (0 y 20 kg ha⁻¹); y las parcelas chicas fueron las dos especies de pastos *B. gracilis* H.B.K [Lag.] y *P. ciliare* L. (el primero corresponde a un pasto nativo y el segundo a un pasto introducido). Se utilizaron dos métodos de siembra, trasplante y siembra directa en campo. Cada unidad experimental consistió en una cama extendida de 5 m de largo y ancho, con una superficie experimental de 1,200 m². La parcela útil fueron cinco surcos centrales donde se seleccionaron seis plantas al azar, en las que se midieron las variables correspondientes.

Para efectuar el trasplante en campo, la siembra del pasto se realizó en charolas de unicel en condiciones de invernadero el 5 de julio de 2016. Como sustrato se utilizó "peat moss". Se aplicaron riegos ligeros uniformes diariamente, evitando la deshidratación de las plántulas. La germinación ocurrió a los tres días después de la siembra en las dos especies de pasto. A los 21 días de la germinación se realizó el trasplante.

La siembra directa en campo, se hizo manualmente, el mismo día que la siembra en charolas. Para esta práctica, se usó rastrillo para remover la capa superficial de suelo, haciendo la aplicación de la semilla al "voleo", procurando dejar la semilla ligeramente cubierta por una delgada capa de suelo no mayor a 3 cm mediante paso de rastrillo. La dosis de siembra aplicada fue de 5 kg ha⁻¹ para las dos especies, sugerida por Melgoza *et al.* (2008).

El rastrojo de maíz en dosis de 10 t ha⁻¹ se aplicó superficialmente como cobertura vegetal antes del trasplante y siembra de los pastos. La aplicación del

hidrogel se realizó manualmente, al mismo tiempo que el trasplante y siembra directa. El hidrogel se depositó a la misma profundidad que el cepellón de la plántula, aplicando 1 y 2 g planta⁻¹, para la siembra por trasplante; en la siembra directa se esparció junto con la semilla. Los hidrogeles son copolímeros granulados que tienen un contenido de materia seca de 85 a 90 %, densidad aparente de 0.85 g ml⁻¹, peso específico de 1.10 g cm⁻³ y pH de 8.1 (SNF, 2016); tienen una capacidad de incrementar la retención de humedad del suelo y con ello aprovechar mejor el agua de lluvia o riego.

El experimento se estableció el 28 de julio de 2016 y las evaluaciones se realizaron durante los ciclos fenológicos de los pastos en los años 2016 y 2017.

Variables climáticas

La precipitación (mm) y la temperatura media (°C) mensual fue registrada a través de la una estación meteorológica semiautomática HeavyWeather Pro WS 2800 instalada en el experimento.

Constantes de humedad en el suelo

Mediante un medidor electrónico (Lutron Modelo PMS-714), se registraron las lecturas de tensión de humedad del suelo (T) en el perfil 0-30 cm, con la finalidad de trasladar posteriormente a unidades volumétricas de agua (Ps) en el suelo utilizando las funciones obtenidas en el laboratorio. Se determinó el potencial hídrico del suelo en Megapascals (Mpa), mediante olla de membrana de presión marca Soil Moisture Equipment® modelo 1500F1 (Sta. Barbara, Cal., USA).

Las curvas de retención de humedad del suelo siguen una función potencial de acuerdo a la Ecuación (3).

$$T = kPs^{-n} \tag{3}$$

Donde Ps es el porcentaje de humedad en el suelo, k y n , son constantes de regresión. Esta ecuación se puede manipular para que, al partir de una tensión de humedad en el suelo (T), arroje el contenido de humedad de éste a esa

tensión. De esta manera, para el perfil 0-30 cm se utilizó la Ecuación (4); el modelo se expresa en la Figura 15.

$$P_s = 15.729 * T^{-0.396} \quad (4)$$

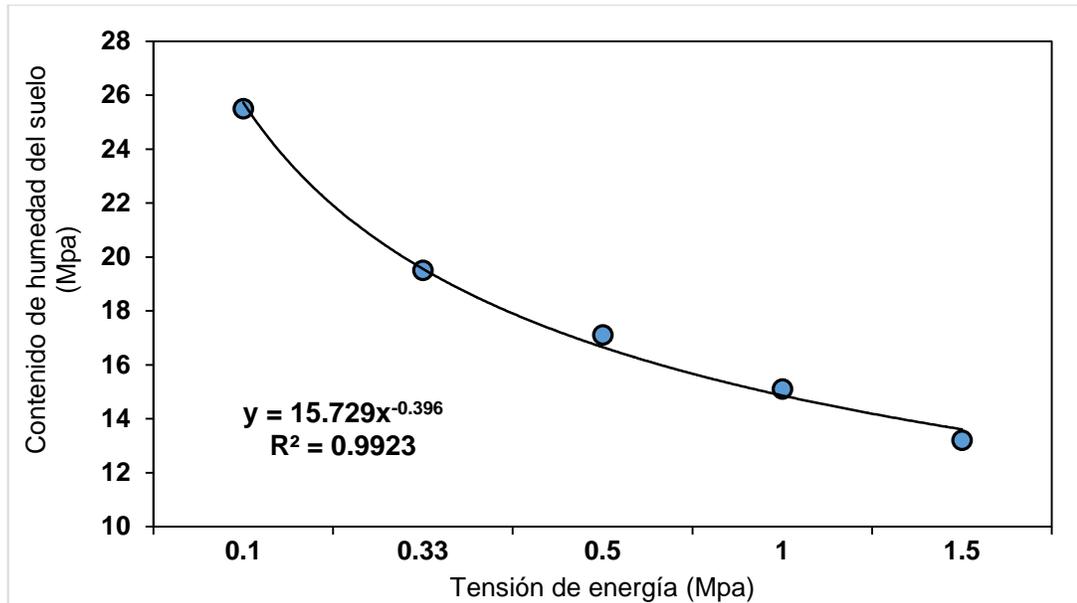


Figura 15. Curva de abatimiento de humedad del suelo en Megapascales (MPa).

Para determinar la reserva de humedad de acuerdo a los valores registrados de tensión de humedad del suelo, se usó la Ecuación (5).

$$Rh = P_s * Da * Pr \quad (5)$$

Donde Rh es reserva de humedad expresada en cm, P_s es porcentaje de humedad, Da es densidad aparente del suelo (1.52 g cm^{-3}) y Pr es profundidad de suelo en m.

Variables medidas

Las variables descritas se evaluaron en el año 2016 y 2017 durante las etapas de crecimiento, desarrollo y madurez fisiológica de los pastos en los meses de julio a noviembre.

Se efectuaron 12 mediciones de las variables morfométricas y fisiológicas, haciéndolas a partir de los 8 días después del establecimiento (DDE);

sobrevivencia de plántula (%), con un sistema de muestreo aleatorio con tramos de 3 m lineales por tratamiento a los 28 DDE; mediante conteo directo por planta; altura de planta (cm), con uso de cinta métrica.

La fotosíntesis ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), transpiración ($\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) y conductancia estomática ($\mu\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) y eficiencia en el uso del agua, se midió seis veces, posterior a la etapa de crecimiento vegetativo, con un sistema portátil de fotosíntesis LI-6400 (LI-COR®, Inc. Lincoln, Nebraska, USA). Las mediciones se hicieron en la hoja bandera de cuatro plantas por parcela útil entre las 11 y 13 h, con luz artificial a una intensidad de $1200 \mu\text{mol fotones m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

El contenido de materia seca (g) de la parte aérea y la raíz de la planta, se realizó seis veces, mediante muestreo destructivo y secado en estufa de aire recirculante, HAFO® (modelo 1600, USA), a $75 \text{ }^\circ\text{C}$ por 36 h. El rendimiento total (kg MS ha^{-1}) de biomasa se determinó al término del ciclo productivo de los pastos. Adicionalmente se evaluó el porcentaje de proteína cruda del pasto (%), usando el método de digestión Kjeldahl ($\text{N} \times 6.25$; AOAC, 1990).

Análisis estadístico

Un análisis ANOVA en variables cuantificadas una vez durante el experimento, un MANOVA con variables medidas a lo largo del ciclo productivo de los pastos y pruebas de medias Tukey, así como análisis de regresión, fueron realizados para identificar el efecto de tratamientos mediante el software RStudio versión 1.0.143 (RStudio, Inc. Boston, MA, USA).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Variables climáticas

La época de lluvias en los dos años de evaluación, ocurrió en los meses de julio a septiembre, con registro más bajos en el resto de los meses del año, excepto en diciembre del 2017 (Figura 16). La precipitación acumulada fue de 346.6 y 274.4 mm en 2016 y 2017, respectivamente.

La precipitación durante los dos ciclos productivos de los pastos, no afectaron el desarrollo de las plantas de *Bouteloua gracilis* H.B.K [Lag.] y *Pennisetum ciliare* L. Al respecto, el pasto *B. gracilis* es una especie nativa con alta adaptabilidad a regímenes moderados de precipitación en la época de crecimiento (García-Moya & Villa, 1977). Igualmente, el pasto *P. ciliare* es una especie exótica muy utilizada para la resiembra de pastizales, principalmente porque en las regiones donde persiste y coloniza, presentan precipitación total de 300 a 600 mm (Ibarra-Flores *et al.*, 1999).

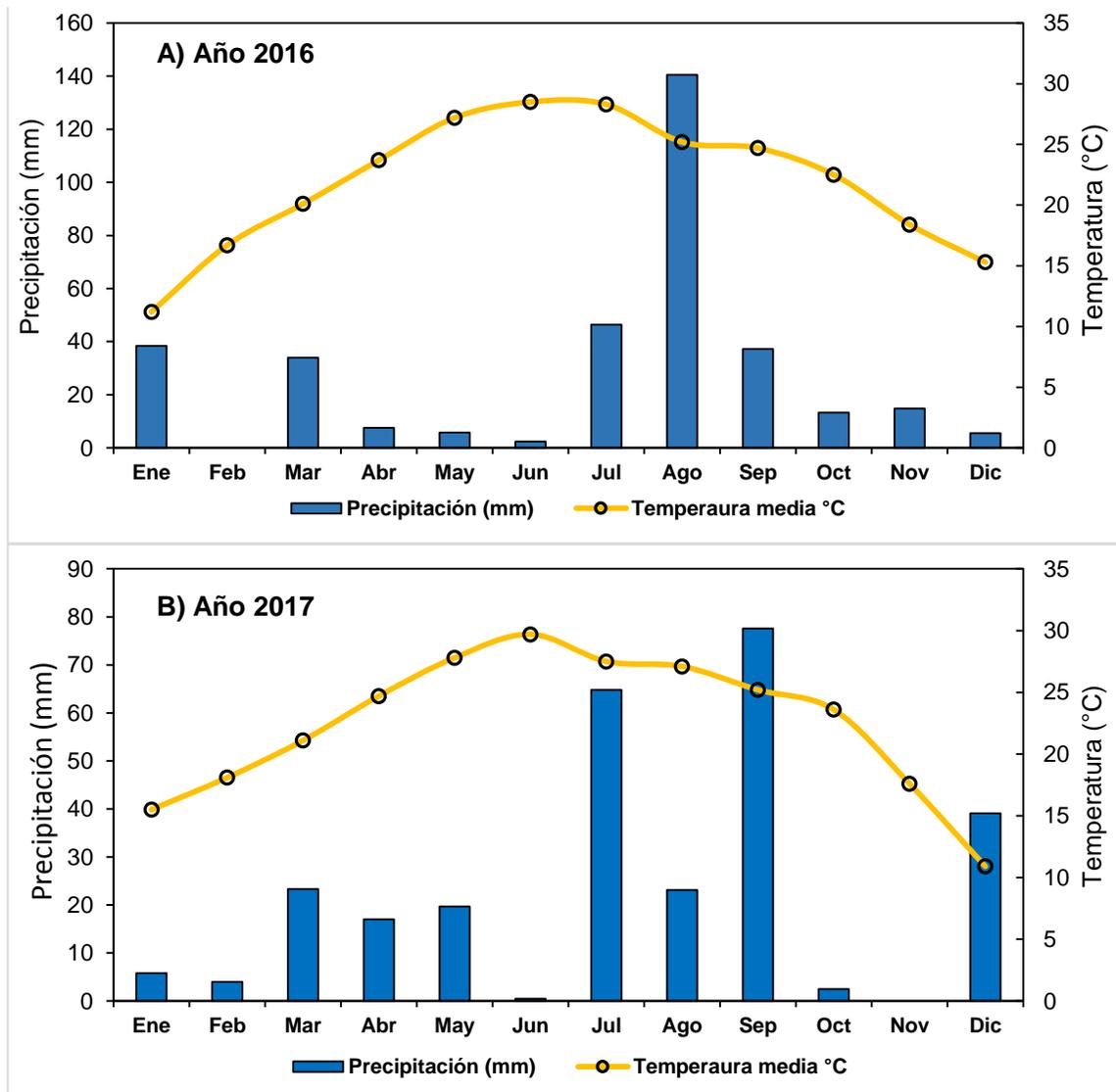


Figura 16. Precipitación y temperatura media mensual registrada en el área de estudio durante el 2016 (A) y 2017 (B).

Cuando los suelos presentan humedad suficiente, el vigor de tallos y de los rebrotes en los zacates tiene respuesta positiva. En adición a la cantidad total de precipitación que se presenta en una zona determinada, es de particular importancia la frecuencia e intensidad característica de los eventos lluviosos (Abbott, 2006).

Conjuntamente, un factor limitante en la proliferación de los pastos es la temperatura, ya que afecta el desarrollo de la planta en varias formas; la más relevante es el efecto que tiene sobre el crecimiento o producción de forraje, tanto bajas como altas temperaturas limitan y afectan estos factores en los pastos (Manske, 2006). Las especies de plantas tienen distinto óptimo de rango de temperaturas, en la estación cálida las plantas con mecanismo de fotosíntesis C₄ como los pastos, tienen un rango óptimo de temperatura entre los 30 a 40 °C (Coyne *et al.*, 1995), condiciones presentadas en el estudio.

Contenido de humedad en el suelo

El contenido de humedad del suelo expresado en tensión (Mpa), mostró diferencias significativas ($p \leq 0.05$) entre el tratamiento testigo y las dosis de rastrojo de maíz, además de su interacción con las aplicaciones de hidrogel en las cuatro fechas de muestreo (Cuadro 14). La aplicación de hidrogel no reportó diferencias estadísticas sobre esta variable.

Respecto a las unidades volumétricas de agua, el Cuadro 14 muestra los resultados de transformar los datos de tensión de humedad del suelo a reserva de humedad registrados para cada tratamiento, empleando las Ecuaciones (4) y (5). La aplicación del rastrojo se asoció a las reservas de humedad más altas ($p \leq 0.05$), con valores de 51.94 cm. La interacción hidrogel y dosis de rastrojo reportaron 47.06 cm. El tratamiento de hidrogel y el testigo, fueron inferiores estadísticamente para esta variable ($p \leq 0.05$), con valores de 42.85 y 43.76 cm, respectivamente.

Cuadro 14. Porcentaje de humedad del suelo en diferentes fechas y cálculo de reservas de humedad para tratamientos con hidrogel, cobertura vegetal con rastrojo de maíz y testigo.

Evaluación del 2016	Lectura de tensión (Mpa)				Reserva de humedad (cm)			
	RM	I-RH	H	Testigo	RM	I-RH	H	Testigo
	0.19	0.19	0.21	0.20	13.84	13.84	13.31	12.62
04-Ago	0.16	0.18	0.25	0.22	14.82	14.14	12.42	13.06
	0.15	0.17	0.23	0.21	15.20	14.47	12.84	13.31
Promedio	0.17 a ±0.01	0.18 a ±0.02	0.23 b ±0.02	0.21 b ±0.01	14.62 a ±0.4	14.15 a ±0.6	12.85 b ±0.9	13.00 b ±0.5
	0.06	0.08	0.09	0.11	21.85	19.50	18.61	17.19
25-Ago	0.07	0.07	0.11	0.09	20.56	20.56	17.19	18.65
	0.05	0.08	0.14	0.10	23.49	19.50	15.62	17.85
Promedio	0.06 a ±0.2	0.08 b ±0.1	0.11 b ±0.2	0.10 b ±0.1	21.97 a ±1.1	19.85 b ±0.8	17.14 c ±1.3	17.88 c ±0.7
	0.58	0.92	1.04	0.97	8.90	7.41	7.06	7.26
15-Sep	0.61	0.96	1.05	1.01	8.72	7.29	7.04	7.14
	0.56	0.89	1.00	0.95	9.02	7.51	7.17	7.32
Promedio	0.58 a ±0.05	0.92 b ±0.09	1.03 b ±0.08	0.98 b ±0.06	8.88 a ±0.5	7.40 b ±0.7	7.09 b ±0.6	7.24 b ±0.4
	1.29	1.85	1.77	1.83	6.48	5.62	5.72	5.65
06-Oct	1.25	1.82	1.71	1.79	6.57	5.66	5.80	5.70
	1.36	1.89	1.74	1.89	6.35	5.68	5.76	5.57
Promedio	1.3 a ±0.02	1.9 b ±0.03	1.7 b ±0.03	1.8 b ±0.01	6.47 a ±0.6	5.65 a ±0.8	5.76 a ±0.5	5.64 a ±0.6
Reserva de humedad total (cm)					51.94 a ±1.9	47.06 b ±1.4	42.85 c ±1.7	43.76 c ±1.2

RM= Rastrojo de maíz (10 ton ha⁻¹); H=Hidrogel (20 kg ha⁻¹); I-RH=Interacción rastrojo de maíz e hidrogel; Testigo=Sin aplicación de retenedores.

^{abc} Cifras con diferente letra dentro de una misma fila y en cada factor de variación (hidrogel y rastrojo de maíz), son diferentes ($p \leq 0.05$).

La conservación de humedad del suelo en los tratamientos con rastrojo de maíz como cobertura vegetal, permitió mantener una tensión inferior. Los resultados anteriores coinciden con estudios que usaron residuos de cosecha en la producción de soya y sorgo de secano, ya que obtuvieron un mayor contenido de humedad en el suelo al aplicar mantillo en ambos cultivos, principalmente en años con precipitaciones irregulares (Obalum *et al.*, 2012). Adicionalmente, se indica que la incorporación de mantillo o paja al primer perfil de suelo, mejora la retención de agua del suelo en los cultivos (Zhao *et al.*, 2014).

Respecto a las aplicaciones de hidrogel al suelo, aunque diversos autores lo han reportado como benéfico en la agricultura por las propiedades que ofrecen sobre la absorción y retención de agua, manteniéndolos disponibles para la planta (Dorrají *et al.*, 2010; Gasque, 2006; Guerrero *et al.*, 2010), los resultados reportados en este estudio, no se asociaron a los contenidos o reservas de humedad del suelo; probablemente hay factores dependientes a la eficacia de estos polímeros, principalmente el tipo de suelo donde se apliquen (Narjary *et al.*, 2012).

Porcentaje de sobrevivencia de plántula

La supervivencia de los zacates varió entre especies, métodos de siembra, tratamientos y entre años de estudio. Particularmente, *B. gracilis* y *P. ciliare*, tuvieron una sobrevivencia superior al 87 %, un mes después del establecimiento, sin embargo, el pasto nativo disminuyó su porcentaje significativamente ($p \leq 0.05$) para el 2017 (Cuadro 15). Ello puede ser atribuible a las condiciones de precipitación bajas durante el invierno 2016-2017 y primavera 2017, de acuerdo a la climatología previamente analizada. Además, Wilson & Briske (1979), señalan que zacate navajita presenta restricciones en la resiembra de pastizales, debido a las dificultades para establecerse en su ambiente natural. En referencia al pasto Buffel, el establecimiento se ha observado en regiones donde la lluvia es superior a 250 mm (Ward *et al.*, 2006), condiciones que se presentaron en el área de estudio.

Respecto al método de siembra, el trasplante fue superior ($p \leq 0.05$) a la siembra directa. Los pastos reportaron más del 83 % en promedio para los dos años, en cambio, los zacates donde se empleó la técnica de siembra directa registraron en promedio porcentajes del 55 %. El establecimiento vegetal a partir de semilla, implica una serie de eventos determinísticos y aleatorios dentro de un ambiente heterogéneo (Harper, 1977). Particularmente, especies de pasto nativas, difícilmente son establecidas por semilla, ya que requiere de un período continuo de humedad para su germinación, establecimiento y crecimiento inicial (Lauenroth *et al.*, 1994). En cambio, se han encontrado valores superiores al 95

% de establecimiento en pastos al utilizar el método del trasplante, por lo que es considerado un método de siembra altamente efectivo aún en suelos con limitada fertilidad natural González *et al.* (2015).

Para los retenedores de humedad del suelo, el porcentaje de sobrevivencia de los pastos para el 2016, fue de 85.1 y 87.3 % al aplicar 20 kg ha⁻¹ de hidrogel y 10 ton ha⁻¹, respectivamente, sin diferencia estadística entre ambos, con mejor tendencia de respuesta, al diferenciarse estadísticamente del testigo ($p \leq 0.05$) (Cuadro 15).

Cuadro 15. Porcentaje de sobrevivencia por especie de pasto, método de siembra, diferentes dosis de hidrogel y cobertura vegetal con rastrojo de maíz en el año 2016 y 2017.

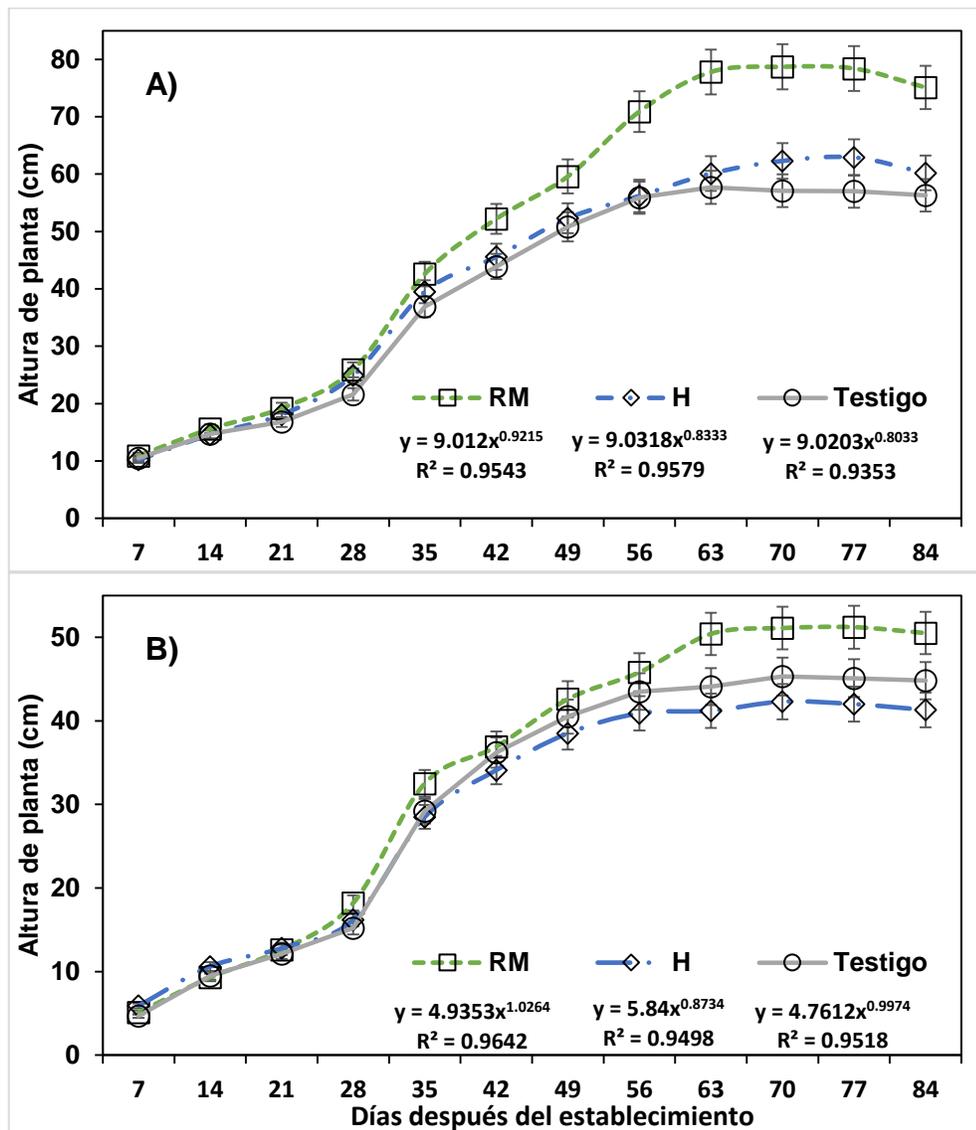
Especie de pasto/Método de siembra/ Dosis de retenedor de humedad	Porcentaje de sobrevivencia	
	2016	2017
<i>B. gracilis</i>	88.56 a ± 2.2	71.54 b ± 3.3
<i>P. ciliare</i>	87.63 a ± 2.5	82.66 a ± 3.9
Trasplante	85.73 a ± 1.8	81.32 a ± 2.6
Siembra directa	57.21 b ± 2.9	52.98 b ± 2.8
Rastrojo de maíz (10 t ha ⁻¹)	87.33 a ± 1.9	78.52 a ± 1.8
Dosis de hidrogel (20 kg ha ⁻¹)	85.19 a ± 2.5	74.28 a ± 2.7
Testigo	69.23 b ± 2.4	61.36 b ± 3.2

^{ab} Cifras con diferentes letras dentro de una misma columna y en cada factor de variación, son diferentes ($p \leq 0.05$).

Crecimiento y desarrollo de la planta

La altura de planta fue superior cuando se aplicó el método por trasplante, respecto al método de siembra directa, independientemente de los retenedores de humedad de suelo evaluados (Figura 17). Sin embargo, los pastos con adición de rastrojo de maíz como cobertura vegetal, tuvieron crecimiento superior a partir de los 35 DDE. Esta tendencia se mantuvo en todas las evaluaciones posteriores, con valores máximos de 80 cm usando el trasplante (Figura 17A); y cercanos a 50 cm en la siembra directa (Figura 17B).

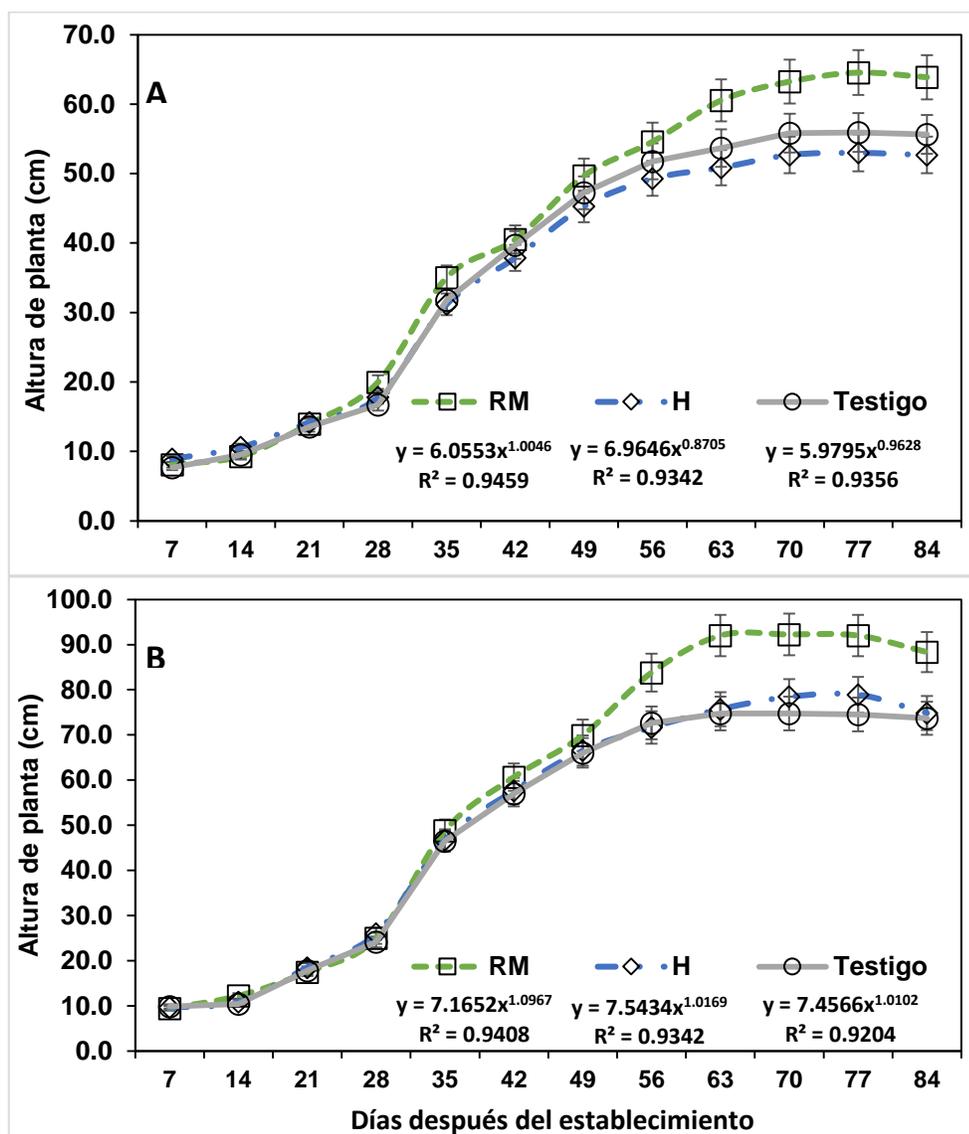
De acuerdo al análisis de regresión, los tres tratamientos tuvieron un comportamiento exponencial, sin embargo, la curva de altura presentó una forma sigmoïdal; la cual, es ampliamente reportada en las tasas de crecimiento de especies vegetales (Salisbury & Ross, 1994). En particular, las plantas adicionadas con rastrojo, reportaron un incremento en altura de 0.92 y 1.02 cm por unidad de dosis de rastrojo, para el método por trasplante y siembra directa, respectivamente.



RM= Rastrojo de maíz (10 ton ha⁻¹); H=Hidrogel (20 kg ha⁻¹); Testigo=Sin aplicación de retenedores.

Figura 17. Altura de plántula con método de siembra trasplante (A) y siembra directa (B), bajo diferentes retenedores de humedad del suelo. Las barras verticales representan el error estándar.

Para las especies de pastos evaluadas, *B. gracilis* reportó menor crecimiento, con valores máximos de 50 cm, independientemente de los retenedores de humedad (Figura 18A). *P. ciliare* registró alturas de planta superiores a los 70 cm (Figura 18B). En particular, la aplicación de rastrojo de maíz en la dosis empleada, se asoció a crecimientos superiores, con incrementos en altura de 1.004 y 1.096 cm por unidad de dosis de cobertura vegetal, para el pasto nativo e introducido, respectivamente.



RM= Rastrojo de maíz (10 ton ha⁻¹); H=Hidrogel (20 kg ha⁻¹); Testigo=Sin aplicación de retenedores.

Figura 18. Altura de plántula para *B. gracilis* (A) y *P. ciliare* (B), bajo diferentes retenedores de humedad del suelo. Las barras verticales representan el error estándar.

En el análisis del contenido de humedad y la altura de planta, se pudo identificar un comportamiento de menor a mayor contenido de humedad, promovido por la cobertura vegetal (Obalum *et al.*, 2012). Otros autores como Cantú *et al.* (2010) y Ramírez de la Ribera *et al.* (2017), señalan que el crecimiento y adaptabilidad de pastizales es promovida por los contenidos de humedad presentes en el suelo. Al respecto, el crecimiento de la planta siempre mostró un comportamiento exponencial, con tendencia de estabilización en las últimas fechas de muestreo, ya que los pastos entraron en una etapa de floración y dejaron de crecer, lo cual confirma la adaptación de los pastos evaluados a las condiciones variables de humedad en el suelo del sitio.

Actividad fotosintética y eficiencia en el uso del agua

El mayor contenido de humedad del suelo en los tratamientos con rastrojo, produjo una mayor actividad fotosintética ($p \leq 0.05$), y ésta a su vez repercutió en efectos en otras variables fisiológicas, en los dos ciclos productivos evaluados. Estos comportamientos no variaron entre años (Cuadro 16). Los métodos de siembra empleados en este estudio, no se asociaron a estas variables de manera significativa.

Para el año 2016, el registro de fotosíntesis fue de $16.92 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, valor superior en 12.8 y 11.0 %, respecto a la dosis de hidrogel y al testigo. En 2017, la fotosíntesis fue de $16.41 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; esa tasa fue superior en 20.8 y 9.3 %, en referencia al hidrogel y el testigo, respectivamente.

En cuanto especies, hubo diferencias significativas ($p \leq 0.05$). *P. ciliare* reportó la mayor tasa fotosintética con 17.83 y $17.68 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ en 2016 y 2017, respectivamente. *B. gracilis* tuvo 14.30 y $13.97 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; los efectos anteriores también se expresaron en la eficiencia en el uso del agua. Este concepto es referido al cociente entre los carbohidratos formados con la fotosíntesis y la transpiración (Sinclair *et al.*, 1984); las plantas asociadas al rastrojo, tuvieron eficiencias superiores en los años evaluados ($p \leq 0.05$) en comparación a las aplicaciones de hidrogel y el testigo, con 21.14 en 2016 y 20.70

en 2017. Entre especies, hubo diferencia estadística ($p \leq 0.05$), ello muestra que los pastos nativos son altamente eficientes en el uso del agua.

Está ampliamente documentado que la fotosíntesis en plantas superiores aumenta conforme el contenido relativo de agua (Lawlor & Cornic, 2002), comportamientos observados en los tratamientos con adición del rastrojo. Los tratamientos donde se aplicó el hidrogel y el testigo, tuvieron menor contenidos de humedad del suelo, manifestando menores tasas fotosintéticas; esta limitación fisiológica, principalmente ocurre a través del cierre de estomas y mediante un desbalance metabólico (Tezara *et al.* 2005).

Cuadro 16. Variables fisiológicas y eficiencia en el uso del agua en dos especies de pastos, dos métodos de siembra y retenedores de humedad del suelo en los años 2016 y 2017.

Factor de variación	Fotosíntesis ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)		Transpiración ($\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)		Conductancia estomática ($\mu\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)		Eficiencia en el uso del agua	
	2016	2017	2016	2017	2016	2017	2016	2017
Especie de pasto								
<i>B. gracilis</i>	14.3 b ± 1.3	13.9 b ± 1.3	0.74 b ± 0.03	0.706 b ± 0.02	0.031 b ± 0.08	0.030 b ± 0.07	19.1 b ± 0.3	19.7 b ± 0.5
<i>P. ciliare</i>	17.8 a ± 0.9	17.6 a ± 0.7	0.86 a ± 0.05	0.854 a ± 0.07	0.036 a ± 0.06	0.035 a ± 0.04	20.5 a ± 0.4	20.7 a ± 0.3
Método de siembra								
Trasplante	15.9 a ± 0.8	14.2 a ± 0.5	0.79 a ± 0.02	0.781 a ± 0.05	0.34 a ± 0.09	0.32 a ± 0.01	20.1 a ± 0.4	18.2 a ± 0.6
Siembra directa	15.8 a ± 0.7	14.0 a ± 0.6	0.78 a ± 0.01	0.789 a ± 0.09	0.35 a ± 0.04	0.34 a ± 0.02	20.0 a ± 0.7	17.8 a ± 0.8
Dosis de retenedor de humedad								
Rastrojo de maíz (10 t ha ⁻¹)	16.9 a ± 0.8	16.4 a ± 1.0	0.800 a ± 0.07	0.792 a ± 0.06	0.34 a ± 0.05	0.33 a ± 0.09	21.1 a ± 0.7	20.7 a ± 0.5
Dosis de hidrogel (20 kg ha ⁻¹)	15.0 b ± 0.9	13.5 b ± 0.5	0.786 a ± 0.04	0.710 a ± 0.05	0.31 a ± 0.07	0.29 b ± 0.01	19.1 b ± 0.8	19.1 b ± 0.1
Testigo	15.2 b ± 0.7	15.0 a ± 0.6	0.789 a ± 0.05	0.790 a ± 0.03	0.33 a ± 0.06	0.31 a ± 0.02	19.3 b ± 0.7	18.9 b ± 0.2

^{ab} Cifras con diferentes letras dentro de una misma columna y en cada factor de variación, son diferentes ($p \leq 0.05$).

Cantidad de biomasa, rendimiento y calidad de forraje

Se identificó que el método de siembra por trasplante incrementó las variables productivas. El peso seco de biomasa, fue superior en promedio en los dos ciclos de producción ($p \leq 0.05$); para *P. ciliare* la biomasa área fue de 75.7 y radical de 38.2 g planta⁻¹, *B. gracilis* reportó 58.7 y 22.1 g planta⁻¹, de biomasa aérea y radical, respectivamente. Igualmente, al rendimiento de forraje fue superior significativamente ($p \leq 0.05$) tanto en *B. gracilis* (906.1 t MS ha⁻¹) como en *P. ciliare* (2025.2 t MS ha⁻¹), al obtener el rendimiento más alto, en promedio de los años evaluados (Cuadro 17). El contenido de proteína cruda no varió entre años o entre métodos de siembra, pero si entre especies. El pasto nativo con valores en promedio de 9.65 % entre años fue superior al introducido con 5.5 %.

Cuadro 17. Peso de biomasa área, radical, rendimiento y contenido proteico en dos especies de pastos y dos métodos de siembra en los años 2016 y 2017.

Especie de pasto	Método de siembra	Peso seco de biomasa aérea (g planta ⁻¹)		Peso seco de biomasa radical (g planta ⁻¹)	
		2016	2017	2016	2017
<i>B. gracilis</i>	Trasplante	61.8 a ±3.1	55.6 a ±1.2	22.5 a ±1.4	21.6 a ±1.0
	Siembra directa	54.9 b ±2.6	48.2 b ±3.2	19.1 b ±0.9	18.8 b ±1.2
<i>P. ciliare</i>	Trasplante	80.2 a ±3.0	71.1 a ±2.9	38.5 a ±3.6	37.8 a ±2.1
	Siembra directa	54.1 b ±4.4	64.3 b ±3.8	29.9 b ±4.4	26.7 b ±3.8
		Rendimiento (t MS ha ⁻¹)		Proteína cruda en MS (%)	
		2016	2017	2016	2017
<i>B. gracilis</i>	Trasplante	919.4 a ±16.8	892.7 a ±19.2	9.9 a ±1.0	9.2 a ±0.9
	Siembra directa	854.6 b ±18.0	798.3 b ±15.5	10.0 a ±0.8	9.5 a ±1.1
<i>P. ciliare</i>	Trasplante	2096.4 a ±31.4	1953.9 a ±27.1	6.1 a ±0.7	5.5 a ±0.6
	Siembra directa	1865.2 a ±22.5	1799.3 b ±30.7	5.1 a ±0.6	5.3 a ±0.8

MS=Materia seca. ^{ab} Cifras con diferentes letras dentro de una misma columna y en cada factor de variación, son diferentes ($p \leq 0.05$).

El método de siembra por trasplante se asoció a las variables productivas estudiadas, al obtener aumentos significativamente mayores en rendimiento de forraje para ambos pastos. Al respecto, los pastos introducidos, suelen tener la mayor cantidad de materia seca que los nativos, sin embargo, los pastos nativos habitualmente son más palatables y de mayor valor nutricional (Velázquez *et al.*, 2015).

CONCLUSIONES

El método de la siembra mediante trasplante con adición de rastrojo, representó una técnica efectiva para incrementar el porcentaje de sobrevivencia de los pastos en promedio 28.4 %, respecto al método de siembra directa.

El contenido de humedad del suelo fue superior asociado a la aplicación del rastrojo, al reportar las reservas de humedad más altas, con valores de 51.94 cm. El tratamiento de hidrogel y testigo, fueron inferiores estadísticamente para esta variable, con valores de 42.85 y 43.76 cm, respectivamente.

El pasto introducido *P. ciliare* tiene mejores ventajas, con respecto a la variedad nativa, mediante una tasa fotosintética superior en $3.62 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ y rendimiento de forraje superior en $1119 \text{ t MS ha}^{-1}$ en promedio, sin embargo, *B. gracilis* fue más eficiente un 6.2 % en el uso del agua, además, fue superior en el contenido proteico con valores en promedio de 9.7 % en los años evaluados.

Las aplicaciones al suelo de hidrogel no se asociaron a las variables medidas.

LITERATURA CITADA

Abbott, L. B. (2006). Ecología y diversidad de pastizales. En Basurto, X. & Hadley, D. (Eds.). *Grasslands ecosystems, endangered species, and sustainable ranching in the Mexico-U.S. borderlands: Conference proceedings. RMRS-P-40* (11-16). Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.

- AOAC, Association of Official Analytical Chemists. (1990). *Official Methods of Analysis*. (15th ed.). Washington, DC, USA: Association of Official Analytical Chemists.
- Cantú B., J. E., Valdés R., J. & Medina T., J. G. (2010). *Gramíneas del norte de México*. (3ª edición). Torreón, Coah. Méx.: UAAAN.
- Cox, J. R., Martin-Rivera, M. H., Ibarra-Flores, F. A., Fourie, J. H., Rethman, J. F. G. & Wilcox, D. G. (1988). The influence of climate and soils on the distribution of four African grasses. *Journal of Range Management*, 41(2), 127-139.
- Coyne P. I., Trlica M. J. & Owensby C. E. (1995). Carbon and nitrogen dynamics in rangeland plants. En Benudah D.J. & Sosebee (Eds.). *Wildland plants: physiological ecology and developmental morphology* (59-167). Denver, CO: Society for Range Management.
- Dorraj, S. S., Golchin, A. & Ahmadi, S. (2010). The effects of hydrophilic polymer and soil salinity on corn growth in sandy and loamy soils. *Clean-Soil, Air, Water*, 38(7), 584-591. doi: 10.1002/clen.201000017
- Echavarría-Chairez, F. G., de la Cruz, J. L. S., Luna, R. G. & García, G. M. (2015). Validación de una estrategia metodológica para la evaluación cualitativa de un pastizal mediano abierto del estado de Zacatecas. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 6(2), 171-191.
- García-Moya, E. & Villa, J. V. (1977). Factores ambientales que afectan la distribución geográfica y ecológica de *Bouteloua gracilis* (H.B.K.) Lag. ex Steud., en el Estado de San Luis Potosí. *Agrociencia*, 28, 3-29.
- Gasque, B. (2006). Los hidrogeles poliméricos como potenciales reservorios de agua y su aplicación en la germinación de semillas de tomate en diferentes tipos de suelos. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 7(3), 199-210.
- González D., J. R., Gómez, M. S. & López, D. A. (2015). *El trasplante garantiza establecer zacates forrajeros en suelos salinos y arcillosos*. Congreso Internacional de Manejo de Pastizales. Durango. Dgo. p. 464.

- Guerrero, R. F. E., Torres, D. L., Anaya, D. M. & Lugo, V. R. (2010). Hidrogeles biopoliméricos potencialmente aplicables en agricultura. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 12(2), 76-87.
- Harper, J. L. (1977). *Population biology of plants*. London: Academic Press.
- Ibarra-Flores, F. A., Cox, J. R., Martín-Rivera, M. H., Crowl, T. A. & Call, C. A. (1995). Predicting buffelgrass survival across a geographical and environmental gradient. *Journal of Range Management*, 48(1), 53-59. doi: 10.2307/4002504
- Ibarra-Flores, F., Cox J. R., Martin-Rivera, M., Crowl, T. A., Norton, B. E., Banner, R. E. & Miller, R. W. (1999). Soil physicochemical changes following Buffelgrass establishment in Mexico. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 13(1), 39-52. doi: 10.1080/089030699263474
- Lauenroth, W. K., Sala, E. O., Coffin, D. P. & Kirchner, T. B. (1994). The importance of soil water in the recruitment of *Bouteloua gracilis* in the shortgrass steppe. *Ecological Applications*, 4(4), 741-749. doi: 10.2307/1942004
- Lawlor, D. W. & Cornic, G. (2002). Photosynthetic carbon assimilation and associated metabolism in relation to water deficits in higher plants. *Plant, Cell and Environment*, 25(2), 275-294. doi: 10.1046/j.0016-8025.2001.00814.x
- Manske, L. L. (2006). *Environmental Factors to Consider During Planning of Management for Range Plants in the Dickinson, North Dakota, Region, 1829-2005*. Dickinson, N.D.: North Dakota State University, Dickinson Research Extension Center.
- Melgoza, A., Morales, C. R., Sierra, J. S., Royo, M. H., Quintana, G. & Lebgue, T. (2008). Manual práctico para la identificación de las principales plantas en los agostaderos de Chihuahua. (2ª edición). Chihuahua, Méx.: Unión Ganadera Regional de Chihuahua-Fundación PRODUCE.

- Moreno-Gómez, B., García-Moya, E., Rascón-Cruz, Q. & Aguado-Santacruz, G. A. (2012). Crecimiento y establecimiento de plántulas de *Bouteloua gracilis* (Kunth) Lag. ex Griffiths y *Eragrostis curvula* var. *conferta* Stapf bajo un régimen simulado de lluvia. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 35(4), 299-308.
- Narjary B., Aggarwal, P., Singh, A., Chakraborty, D. & Singh, R. (2012). Water availability in different soils in relation to hydrogel application. *Geoderma* (187-188), 94-101. doi: 10.1016/j.geoderma.2012.03.002
- Obalum, S. E., Igwe, C.A. & Eze, O. M. (2012). Soil moisture dynamics under rainfed sorghum and soybean on contrasting tillage-mulch seedbeds in a mineral sandy loam at derived savanna of south-eastern Nigeria. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 58(11), 1205-1227. doi: 10.1080/03650340.2011.575065
- Ortíz-Cano, H. G., Trejo-Calzada, R., Valdez-Cepeda, R. D., Arreola-Ávila, J. G., Flores-Hernández, A. & López-Ariza, B. (2009). Fitoextracción de plomo y cadmio en suelos contaminados usando quelite (*Amaranthus hybridus* L.) y micorrizas. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 15(2), 161-168.
- Padilla, C., Crespo, G. & Sardiñas, Y. (2009). Degradación y recuperación de pastizales. *Revista cubana de ciencia agrícola*, 43(4), 351-354.
- Pellant, M., Shaver, P. L., Pyke, D. A., Herrick, J. E., Busby, F. E., Riegel, G., Lepak, N., Kachergis, E., Newingham B. A. & Toledo, D. (2018). *Interpreting Indicators of Rangeland Health, Version 5. Tech Ref 1734-6*. Denver, CO: U.S. Department of the Interior, Bureau of Land Management, National Operations Center.
- Quero-Carrillo, A. R. Miranda, L. & Hernández G. A. (2013). Pasto Rhodes *Chloris gayana* Kunth. En Quero-Carrillo, A.R. (Ed.). *Gramíneas Introducidas: Importancia e impacto en ecosistemas ganaderos* (159-167). Montecillo, Texcoco, Estado de México: Biblioteca Básica de Agricultura. COLPOS. doi: 10.13140/2.1.1312.8002

- Ramírez de la Ribera, J. L., Zambrano-Burgos, D. A., Campuzano, J., Verdecia-Acosta, D. M., Chacón-Marcheco, E., Arceo-Benítez, Y., Labrada Ching, J. & Uvidia-Cabadiana, H. (2017). El clima y su influencia en la producción de los pastos. *Revista Electrónica de Veterinaria*, 18(6), 1-12.
- Ramírez-Lozano, R. G., Enríquez-Martell, A. & Lozano-González, F. (2001). Valor nutricional y degradabilidad ruminal del zacate buffel y nueve zacates nativos del NE de México. *Ciencia UANL*, 4(3), 314-321.
- Salisbury, F. B. & Ross, C. W. (1994). *Fisiología vegetal*. México, D.F.: Grupo Editorial Iberoamericana S.A.
- Servicio Meteorológico Nacional (SMN). (2010). Normales climatológicas, periodo 1981-2010. Recuperado de <https://smn.cna.gob.mx/es/informacion-climatologica-por-estado?estado=dgo>
- Sinclair, T. R., Tanner, C. B. & Bennett, J. M. (1984). Water-use efficiency in crop production. *BioScience*, 34: 36-40. doi: 10.2307/1309424
- SNF Inc. (2016). *Water retainers for soils and substrates*. Recuperado de https://snf.com.au/downloads/Aquasorb_E.pdf
- Spain, J. M. & Gualdrón, R. (1991). *Degradación y rehabilitación de pasturas. Establecimiento y renovación de potreros. Conceptos, experiencias y enfoques de la investigación*. Cali, Colombia: Red internacional de evaluación de pastos tropicales. Sexta reunión Comité Asesor CIAT.
- Tezara, W., Marín, O., Rengifo, E., Martínez, D. & Herrera, A. (2005). Photosynthesis and photoinhibition in two xerophytic shrubs during drought. *Photosynthetica*, 43(1), 37-45. doi: 0.1007/s11099-005-7045-5
- Velázquez M., M., Hernández G., F. J., Cervantes B., J. F. & Gámez V., H. G. (2015). *Establecimiento de pastos nativos e introducidos en zonas áridas de México*. San Luis Potosí, SLP Méx.: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, CIR-Noreste.

- Ward, J. P., Smith, S. E. & McClaran, M. P. (2006). Water requirements for emergence of buffel grass (*Pennisetum ciliare*). *Weed Science*, 54, 720-725. doi: 10.1614/WS-05-163R1.1
- Wilson, A. M. & Briske, D. D. (1979). Seminal and adventitious root growth of blue gramma seedlings on the Central Plains. *Journal of Range Management*, 32, 209-213. doi: 10.2307/3897124
- Wilson, A. M., Hyder, D. N. & Briske, D. D. (1976). Drought resistance characteristics of blue gramma seedlings. *Agronomy Journal*, 68, 479-484. doi: 10.2134/agronj1976.00021962006800030012x
- Zhao, Y., Pang, H., Wang, J., Huo, L. & Li, Y. (2014). Effects of straw mulch and buried straw on soil moisture and salinity in relation to sunflower growth and yield. *Field Crops Research*, 161, 16-25. doi: 10.1016/j.fcr.2014.02.006